

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Aplikace více-čipové LED v hlavním světlometu
vozidla**

**Application of Multi-Chip LED in Main Headlamp of
Vehicle**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Dohnal**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612T015 Elektronika
Téma: Aplikace více-čipové LED v hlavním světlometu vozidla
Application of Multi-Chip LED in Main Headlamp of Vehicle
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše aktuálního stavu a výběr vhodné varianty řešení.
2. Návrh optického systému pro hlavní světlomet ve funkci potkávací a dálkové za použití více-čipové LED.
3. Simulace navrženého optického systému.
4. Realizace funkčního vzorku.
5. Vzájemné porovnání s konvenčními halogenovými a xenonovými systémy.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Xingming Long, Jugang He, Jing Zhou, Liang Fang, Xia Zhou, Fan Ren, Tao Xu: A review on light-emitting diode based automotive headlamps, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 41, pp. 29–41, DOI:10.1016/j.rser.2014.08.028, 2015.
2. Jing Wang, Yi-xi Cai, Xin-jie Zhao, Chun Zhang: Thermal design and simulation of automotive headlamps using white LEDs, Microelectronics Journal, Vol. 45, Issue 2, February, pp. 249–255, DOI:10.1016/j.mejo.2013.11.011, 2014.
3. Xiangbing Zhu, Qian Zhu, Han Wu, Chun Chen: Optical design of LED-based automotive headlamps, Optics & Laser Technology, Vol. 45, pp. 262–266, DOI:10.1016/j.optlastec.2012.05.040, 2013.

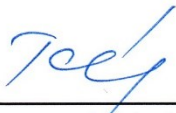
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.**


Konzultant diplomové práce: Mgr. Mikuláš Zápražný

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem veškeré literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal informace“

V Ostravě dne 29.4.2016

Podpis 

Poděkování

Děkuji panu prof. Ing. Pavlu Brandštetterovi, CSc, za odborné konzultace a vedení při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Mikuláši Zápražnému, který mě vedl po praktické stránce a dále pak děkuji firmě Varroc Lighting System ,která mi umožnila vypracování této diplomové práce.

Abstrakt

Cílem této práce je ukázat aplikaci vícečipové led diody v hlavním světlometu pro hlavní funkce potkávací a dálkové. Práce je členěná do několika kapitol. Druhá až pátá kapitola se věnuje rešerši základní teorie o led diodách. Další kapitoly se zabývají konstrukcí projektorové jednotky s led diodou, kde jsou ukázány optické výstupy z jednotky a celková konstrukce všech dílů. Na závěr porovnáváme mini projektor s xenonovým a halogenovým projektorem.

Abstract

The aim of this thesis is to show the application of multichip led diode in the headlamps for the main function especially for low beam and high beam function. This thesis is divided into several chapters. Chapters two to five deal with the basic theory of the led diodes. The next chapter is focused on the projector construction unit with multichip led diode where are presented optical outputs from projector unit and all construction parts. The final part of the thesis deals with the comparison of mini projector unit with high intensity discharge projector and halogen projector.

Klíčová slova

Projektor, led dioda, clona, čočka, reflektor, chladič

Key words

Projector, led diode, shield, lens, reflector, heatsink

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Vlastnosti LED diody.....	10
2.1	Princip funkce LED.....	11
2.1.1	PN přechod.....	11
2.1.2	Rekombinace.....	12
2.2	Vlnová délka a účinnost LED	13
2.3	Světelné veličiny	14
3	Konstrukce LED.....	16
3.1	Multichip LED	17
3.2	Multichipová led firmy Osram	17
3.2.1	Pouzdro	17
3.2.2	Osazení LED na chladič	18
3.2.3	Tepelný management LED OSRAM OSTAR	19
3.2.4	Připojení LED	21
4	Binování LED diod	23
4.1	Barevné třídění	23
5	Použití více čipové LED v optických systémech	25
5.1	Parabolový systém.....	26
5.2	Projektorový systém.....	28
6	Návrh a konstrukce projektorové jednotky pro potkávací a dálkovou funkci.....	29
6.1	Hlavní části projektoru pro potkávací funkci	29
6.1.1	Reflektor.....	29
6.1.2	Clona	31
6.1.3	Čočka.....	32
6.2	Úprava potkávací jednotky na dálkovou	34
6.2.1	Simulace projektorové jednotky.....	35
6.2.2	Měření reálného vzorku	36
6.2.3	Porovnání simulace a reálného měření.....	37
7	Tepelný management	39
7.1	Výpočet chladiče pro potkávací a dálkový modul	39
7.2	Teplená simulace.....	43
8	Porovnání projektorových jednotek s LED, HID a halogen světelným zdrojem	46
8.1	Světelné zdroje	46

8.1.1	Halogenová žárovka	46
8.1.2	Xenonová výbojka.....	47
8.1.3	Led dioda.....	47
8.2	Halogenový projektor.....	48
8.3	Projektor s xenonovou výbojkou.....	50
8.4	Projektor s LED diodou.....	52
8.5	Závěrečné porovnání	54
9	Reálný vzorek.....	57
	Závěr	58
	Seznam použitých zdrojů	60

1 Úvod

Svou diplomovou práci na téma „*použití vícečipové led*“ jsem si vybral proto, že v době 21. století je použití LED diod v automobilovém průmyslu stále populárnější. Má práce by měla vyzvednout důležitost kvalitního osvětlení v silniční dopravě a z tohoto plynoucí větší bezpečnosti na komunikacích. Dále bych se zaměřil na složitost konstrukce jednotlivých komponentů v projektorové jednotce a s tím související simulační a reálné zkoušky (požadavky na optický výkon). Z mé práce vyplýne, že LED dioda je nejdůležitější součástí celého systému.

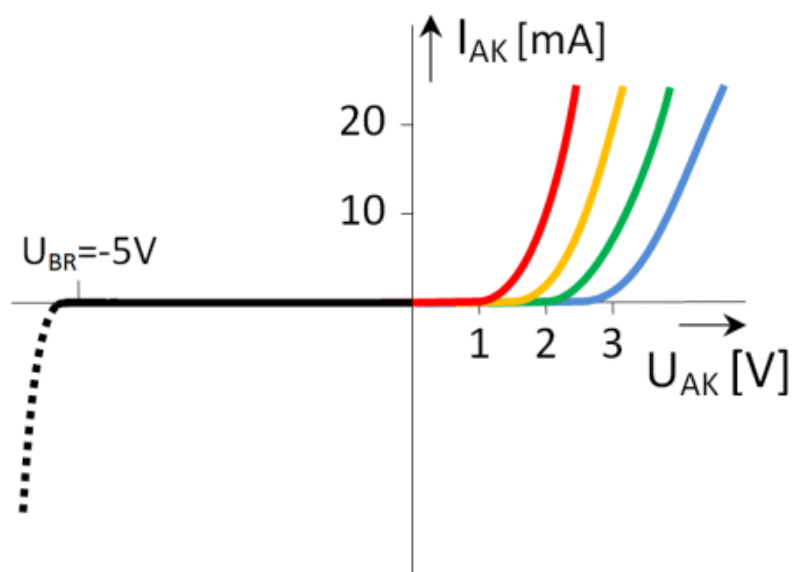
První funkční systém, který byl v osvětlovací soustavě použit, byly acetylenové lampy, které se používaly pro osvětlení kočárů (jednalo se o signální funkce) a tento sloužil, pro zobrazení velikosti pohybujícího se objektu na komunikaci. To vše se datuje kolem roku 1896, systém se uplatňoval až do doby, kdy vznikly první konstrukce s použitím obyčejné žárovky. S technologickým rozvojem se postupně žárovky vylepšovaly, až vznikly halogenové žárovky, se kterými byly paralelně vyvíjeny xenonové výbojky. Následovaly LED technologie, které se v současné době prosazují do hlavních lamp.

LED diodové technologie v automobilovém průmyslu nám umožňují konstrukčně a designově zajímavé tvary projektorových modulů, na které bude tato závěrečná práce směřována. V práci se seznámíme s vhodným výběrem typu LED, optimalizováním výstupního toku a nastavením správného proudu pro splnění homologačních norem.

Závěrečná práce bude rozdělena do dvou celků, a to na teoretickou část, kde bude rozebrána konstrukce svítivé LED diody a s tím související problémy chlazení a binování, které je velice důležité pro barvu a výkon led diody. Práce bude dále obsahovat praktickou část, která pojednává o designu projektorového systému, jeho simulace ve výpočetním programu a dále pak praktickou ukázkou výroby projektorové jednotky, se zaměřením na goniometru jeho základních vlastností.

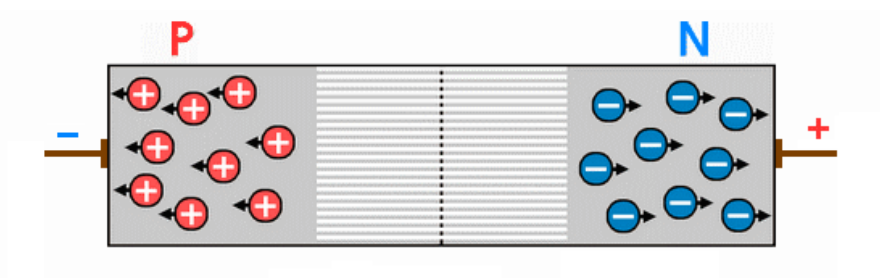
2 Vlastnosti LED diody

LED dioda je polovodičová součástka, která má speciálně upravený PN přechod, aby mohl vyzařovat viditelné světlo tzv. elektroluminiscence. Přechod diody je složen z prvku P a N. Prvek P je většinou křemíková destička s příměsí galia, hliníku, india nebo bóru. Druhá část je přechod typu N, zde se používá křemíková destička, která obsahuje příměs arzenu, fosforu nebo antimonu. Barva světla vycházející z přechodu je daná přesným chemickým složením. Aby mohla svítivá LED dioda vyzařovat světlo, musí být PN přechod polarizován v propustném směru (kladně). Pokud bychom přechod polarizovali záporně (závěrný stav), dioda nebude svítit a je omezená maximálním závěrným napětím, toto napětí se u LED udává cca -5 V.



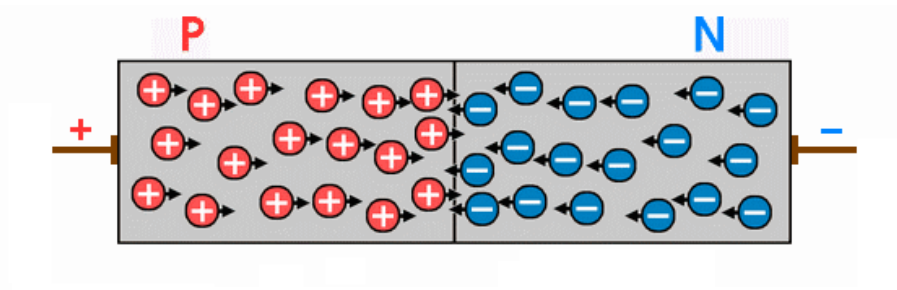
Obr. č. 1 Voltampérová charakteristika LED diody [2]

PN přechod v závěrném stavu je tehdy, když máme na anodě (kladná elektroda) připojený záporný pól zdroje a na katodě (záporná elektroda) kladný pól zdroje. V tomto případě jsou přitahovány záporné nosiče (elektrony) ke kladnému pólu a kladné nosiče (díry) k zápornému pólu. To nám způsobí, že diodou neprochází elektrický proud a dioda nesvítí. [1]



Obr. č. 2 PN přechod polarizovaný záporně [2]

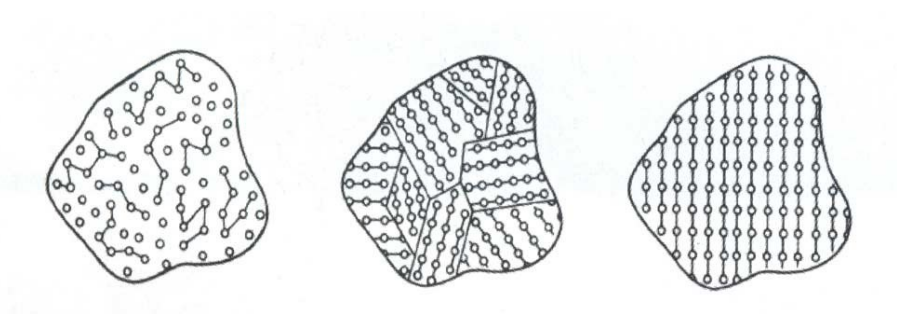
Pokud budeme PN přechod pólovat kladně (propustně), to znamená opačně než u záporného pólování, tak na anodě budeme mít kladný pól zdroje a na katodě záporný pól zdroje. Kladné nosiče jsou kladným pólem odpuzovány pryč a záporné nosiče jsou odpuzovány záporným pólem, což nám způsobí průchod mezi vrstvami. Dioda tak propouští elektrický proud a LED dioda nám bude vydávat světlo. [1]



Obr. č. 3 PN přechod pólovaný kladně [2]

2.1 Princip funkce LED

Základním stavebním kamenem toho, aby LED dioda mohla plnit svou funkci, je elektroluminiscence, která je hlavním a důležitým prvkem proto, aby dioda svítila. Jednoduchým shrnutím můžeme říci, že abychom vytvořili foton potřebný k rozsvícení diody, dojde k tomu, že se zajistí rekombinace elektronu s dírou. Tento jev můžeme nazývat jako přímou přeměnu energie na viditelné světlo. Světlo emitující diody LED ve své podstatě řadíme do skupiny světelných zdrojů, které vyzařují z pevné fáze, z tohoto důvodu se můžeme setkat s jinou zkratkou SSL (Solid-State Lighting) než klasické LED, které je všeobecně známé.



Obr. č. 4 Ukázka pevné látky (amorfní, polykrystalická, monokrystalická) [3]

2.1.1 PN přechod

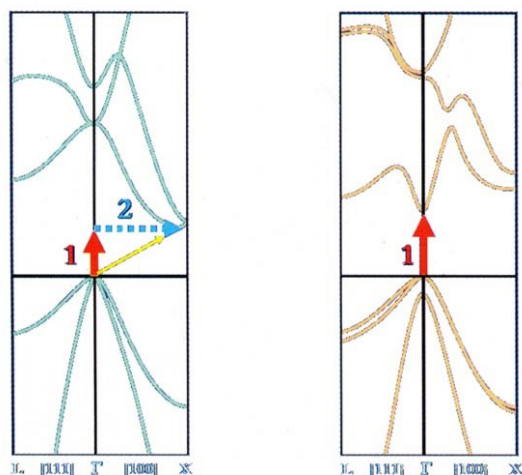
PN přechod v LED diodě je hlavní součást, která zajišťuje funkčnost diody. Abychom tento přechod mohli vytvořit, budeme potřebovat materiály s různými typy vodivosti. Na tomto principu funguje jak klasická dioda, tak i LED dioda a získáme tak jev, při němž prochází elektrický proud vždy jedním směrem. Vrstva typu N má v sobě nadbytek volných elektronů. Vrstva typu P má opačný charakter a vyznačuje se obsahem děr. Na rozhraní těchto dvou vrstev dochází k tzv. rekombinaci volných nosičů náboje a poté mají nepohyblivé ionty vliv na vznik elektrického pole a dochází k

zabránění průchodu zbylých volných nosičů. Tím dojde k vytvoření energetické bariéry, nazývané se oblastí prostorového náboje. Principiálně je u klasických diod snahou, aby po přiložení vnějšího elektrického pole v oblasti prostorového náboje, bylo zaručeno projití maxima volných nosičů náboje a nedocházelo tak ke ztrátám v oblasti prostorového náboje. To by způsobovalo snížení účinnosti a zároveň by docházelo k oteplování součástky, což by mohlo vést k destruktivnímu zničení součástky. U LED diody je snahou, aby maximum těchto nosičů rekombinovalo a došlo tak k záření v podobě viditelného světla. Celý rekombinační proces má vliv na to, že nám LED dioda svítí (vydává světlo), bez toho to procesu by k vylučování fotonu z přechodu nedocházelo a dioda by nesvítla. [3, 5]

2.1.2 Rekombinace

Jak již bylo zmíněno v předchozí podkapitole, rekombinace je důležitou součástí správného fungování LED diody. Tento proces může nastat pomocí několika způsobů, ovšem ne vždy se povede vyžárit foton naopak, vzniká nežádoucí stav, a to vyžáření tzv. fononu, to je částice, která způsobuje zahřívání (oteplování) součástky. K vyžáření fononu může dojít ve spojitosti s vadou (poruch) v krystalové mřížce materiálu nebo na jejím povrchu. Samotný děj rekombinace již způsobuje zahřívání součástky, pokud se ještě k tomu přidá nežádoucí fononové vyzařování, dochází tak k ještě většímu oteplování celé struktury.

Pro vyzařování fotonu máme celkem dva možné principy, ty úzce souvisí s pásovou strukturou krystalu. Základní rekombinace je nazývána jako zářivá (absorpční) a z ní vycházejí dva typy vyzařování, a to přímé a nepřímé. K přímému vyzařování dojde tehdy, potká-li se ve stejném místě maximum valenčního a minimum vodivostního pásu a z toho vyplývá přímé vyzařování. Druhý typ vyzařování je nepřímé, ovšem to je mnohem složitější, než předchozí přímé vyzařování, neboť minimum a maximum pásů jsou navzájem posunuty (nejsou ve stejném místě) a zároveň musí do rekombinačního procesu vstoupit fonon, což značně komplikuje vyzařování. Pro příklad můžeme uvést materiály, u nichž tyto druhy vyzařování nastávají pro přímé vyzařování, to je materiál GaAs, a pro nepřímé vyzařování, to je prvek Si. Z toho vyplývá, že pro pásový charakter neuplatníme křemík Si, jelikož není vhodný pro použití u LED, a to z toho důvodu, že vyžáření jednoho fotonu je značně složité a navíc při vyžáření jednoho fotonu vzniká jeden fonon, což způsobuje nežádoucí teplo a součástka by tak byla tepelně více namáhána. [3, 5]



Obr. č. 5 Si nepřímá rekombinace, GaAs přímá rekombinace; 1 vznik fotonu, 2 vznik fononu [3]

2.2 Vlnová délka a účinnost LED

V dnešní době se setkáváme s LED diodami, které mají různou barvu vyzařování (červená, zelená, žlutá atd.). Vlnovou délku (barvu) lze tedy měnit podle toho, jaké materiály (možná koncentrace jednotlivých prvků) na výrobu led diody zvolíme. To, že volbou materiálu měníme vyzařovací vlnovou délku, je dáno tím, že každý materiál má různou šířku zakázaného pásu, z toho vyplývá, že je jiná energie pro každý materiál, kterou musí elektron přijmout/vyzářit, aby tento pás překonal.

Barva	Materiál	
	AlInGaP	InGaN
Červená	x	
Jantarová	x	
Zelená	x	x
Modrá		x
Bílá		x

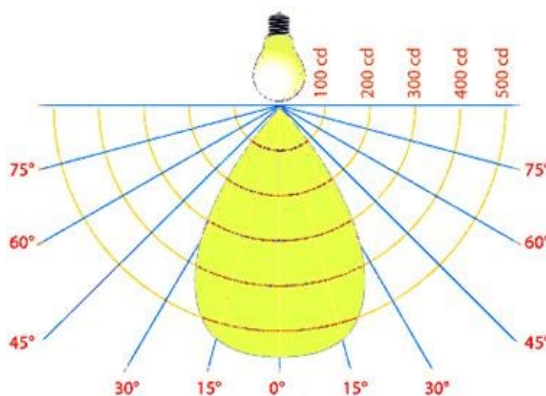
Tab. č.1 Barva podle použitého materiálu

Účinnost led diody je v podstatě dána tím, kolik elektronů umožní přeměnit svou energii na teplo a kolik elektronů bude vyzářeno ve formě fotonu (světla) do prostoru. Účinnost LED diody lze do jisté míry ovlivňovat navržením dostatečně dimenzovaného chlazení, které má obrovský vliv na celkovou účinnost diody. Chlazením se nám ochlazuje přechod a redukuje se vznik fononů. Do jisté míry jsme schopni teplo odvádět, ovšem i tak se dioda zahřívá a běžné chlazení, které se vyskytuje v automobilových lampách, je účinné pouze chvíli, než se v lampě zvýší teplota. Z důvodu, že led dioda je v lampě uzavřená a není umožněno dostatečného nasávání venkovního vzduchu, můžeme v podstatě říci, že v lampě cirkuluje pouze teplý vzduch, který nedokáže celý systém ochladit. [3, 5]

2.3 Světelné veličiny

V této kapitole se blíže zaměříme na světelné vlastnosti LED diody, jež jsou důležité pro tvorbu celkového světelného svazku, který bude promítán na komunikaci.

Svítivost – jedná se o světelnou jednotku, která udává, kolik světelného toku je vyzařováno do prostorového úhlu. Jednotkou svítivosti je cd (kandela). Pro srovnání: 1 cd se rovná přibližně 1 svíčke. Označení veličiny je I. Na svítivosti je závislá veličina příkon, která udává, kolik energie zdroj spotřebuje a svítivost, jak moc bude svítit. Jako příklad poslouží wolframová žárovka o příkonu 100 W v porovnání s LED, která při stejné svítivosti má cca 8 krát menší příkon.



Obr. č. 6 Ukázka svítivosti [4]

Světelný tok – je veličinou, která udává, jak výkonný je světelný zdroj. Označujeme ho jako Φ . Jedná se o světelnou energii, kterou zdroj vyzaří za 1 sekundu. Jednotkou je lm, což je velmi důležitá veličina pro konstrukci světloometu, jelikož nám udává, kolik světelného toku z LED-ky budeme mít při jízdě na cestě, při průchodu optickým systémem.

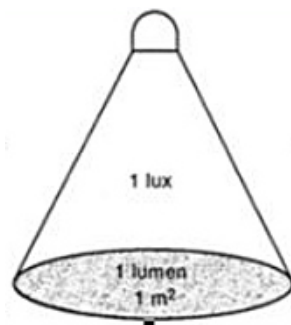
Intenzita osvětlení – tato veličina se označuje písmenem E. Jednotkou této veličiny je lm/m^2 , z toho tedy vyplývá, že se jedná o část světelného toku, která dopadá na určitou plochu. Veličinu můžeme snadno měřit tzv. luxmetrem. V konstrukci světloometu se jedná také o velice důležitou veličinu, jelikož tvoří tzv. maximum světelného svazku, které bude v této práci popsáno v následujících kapitolách. [4]

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{\Phi}{S} \text{ (lx)}$$

Pro bodový zdroj musíme vzorec upravit:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha \text{ (lx)}$$

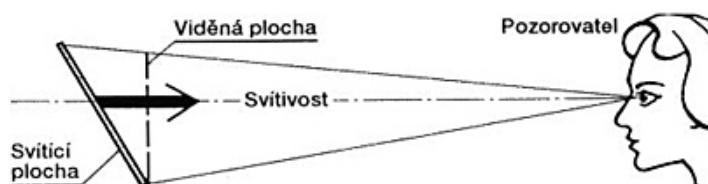
Definice vzorce: osvětlení pro bodový zdroj je nepřímo úměrné čtverci délky a slabší tím více, čím šikměji paprsky dopadnou.



Obr. č. 7 Definice intenzity osvětlení

Jas – je veličina označující se písmenem *L* a vyjadřuje poměr svítivosti, kterou zdroj může poskytnout nebo odrazit (vyzářit) z elementu ve směru k pozorovateli v závislosti na ploše elementu ve směru pozorování. Jednotkou je cd/m^2 .

$$L = \frac{I}{dA \cdot \cos \alpha} \left(\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right)$$



Obr. č. 8 Definice jasu

Oslnění – jedná se o důležitou veličinu při konstrukci hlavního světlometu, jelikož světlomet sám o sobě nesmí oslňovat. Definice oslnění je taková, že pokud dojde k výskytu nadměrného jasu, nebo rozdílů prostorové, či časové změny kontrastů jasů v zorném poli oka, vzniká oslnění. Fyziologicky je oko adaptováno na určitou hodnotu jasu, pokud tuto hodnotu překročíme, dojde k oslnění. V další části této práce bude objasněno, jak se takové oslnění dá eliminovat a co ho může způsobovat. Oslnění můžeme rozdělit do tří základních skupin:

- **Přímé** – vzniká většinou přímo světelným zdrojem nebo jeho povrchem
- **Odrazem** – tento druh oslnění vzniká odrazem od nějaké plošky, která světlo pošle tam, kde nechceme
- **Přechodné** – druh tohoto oslnění vzniká tehdy, dojde-li k náhlé změně jasu z adaptační hodnoty na hodnotu vyšší (například výjezd z tunelu při slunečném dni) [4]

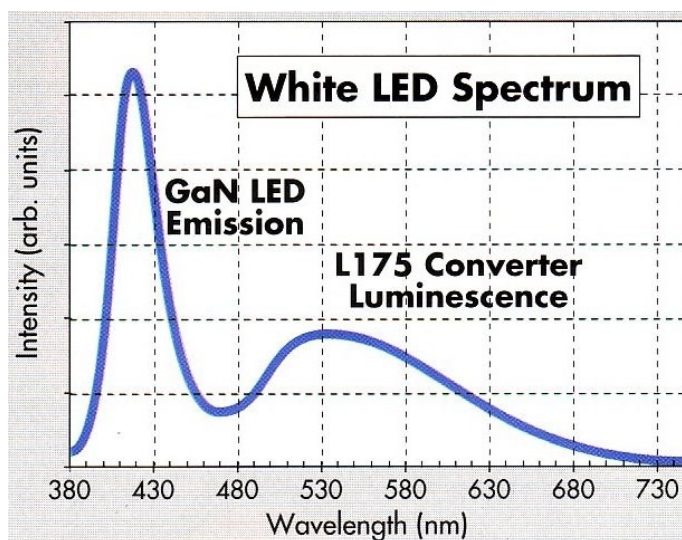
3 Konstrukce LED

Světelné LED diody v kombinaci s použitím v hlavním světlometu je záležitostí 21. století. Jsou to nejmodernější světelné zdroje, které se v automotive používají. Dále je důležité přijmout fakt, že led diody jsou velice choulostivé na prostředí, v němž se používají. Led diody musí odolávat velkým změnám teplot, od -30°C do $+100^{\circ}\text{C}$, což je velká tepelná oblast, a i to je důvod, proč je nástup LED technologie pomalejší.

Označení LED pochází z anglického slovního spojení Light-Emitting-Diode, což je dioda emitující světlo. Jedná se o polovodičovou součástku s PN přechodem. Tento přechod je speciálně upraven tak, aby vyzařoval fotony, což umožňuje produkovat světlo o určitých vlastnostech. Pokud začne diodou procházet proud v propustném stavu, začne PN přechod vyzařovat světlo podle typu diody. Vyzařované světlo se pohybuje od UV záření, přes záření ve viditelném spektru, až po spektrum infra červené, vše závisí na chemické příměsi v PN přechodu. Pro využití LED v hlavním světlometu musí dioda vyzařovat barvu bílou. Jelikož to není jednoduše možné, používají se pro vytvoření této barvy různé metody.

První metoda je založená na míchání tří barevných složek: červená – red, zelená – green a modrá – blue. Tím vznikne na vrchlíku diody vjem, kdy dioda vyzařuje bílé světlo, v podstatě se jedná o tři barevné čipy. To je nevýhodné z důvodu velikosti diody a také proto, že jednotlivé čipy mohou různě degradovat, tím se změní barevné míchání a poté se barva diody podstatně změní.

Druhá metoda využívá k přeměně na viditelné světlo luminofor (podobně jako zářivka). Světlo o určité vlnové délce dopadá na luminofor, který toto záření přemění na záření ve viditelném spektru. Světlo vycházející z čipů a dopadající na žlutou vrstvu luminoforu, leží v oblasti modrého, až UV světla. [6]



Obr. č. 9 Vznik bílého světla za pomoci luminoforu [7]

3.1 Multichip LED

V této kapitole bude objasněna výroba multichipové led diody, dále pak uvedu problémy, které nastávají při použití. Následovat bude tepelný management, který je nezbytná jak při výrobě tak poté při použití zvolené aplikace.

Implementací více čipů, které spadají do kategorie vysoce svítivých, tím získáme LED diodu, kterou označujeme jako multi-chip LED. Výrobci multi-chipových LED mají speciální série, které jsou určeny pro automotive, ty se dále dělí na podskupiny podle použití. Předními výrobci LED v oblasti venkovního osvětlení jsou firmy OSRAM, PHILIPS a také firma NICHIA.

3.2 Multichipová led firmy Osram

Firma Osram vyvinula multichipovou LED, která je vhodná pro použití do hlavních světlometů a patří do rodiny Ostar.

3.2.1 Pouzdro

Konstrukce Osram Ostar je taková, že její pouzdro obsahuje více polovodičových čipů, maximálně však 5, tyto čipy jsou vyrobeny technologií tenkých vrstev ThinGaN. Díky ní mohou diody poskytovat vysokou účinnost i dobré světelné vlastnosti. Dalším vylepšením multichipové led bylo modifikování pomocí ThinGaN/UX technologie, která upravuje materiál kolem LED čipu a následně odstraňuje ochranný kryt, to znamená, že čipy nemají žádnou ochranu a mohou se snadno poškodit, ovšem při dodržení určitých bezpečnostních opatření během manipulace nedojde k žádnému poškození.

Jednotlivé čipy jsou uloženy do pouzdra, které je vloženo do keramického substrátu, to umožňuje lepší odvod tepla od čipů. Keramika je dále připevněna na hliníkovém izolovaném plátu, který poté může být připevněn na PCB (IMS). Vystupující kontakty musí být chráněny před vnějšími vlivy prostředí. Tuto ochranu zajišťuje Globe-Top vrstva, neboť se jedná o elastickou ochrannou vrstvu.

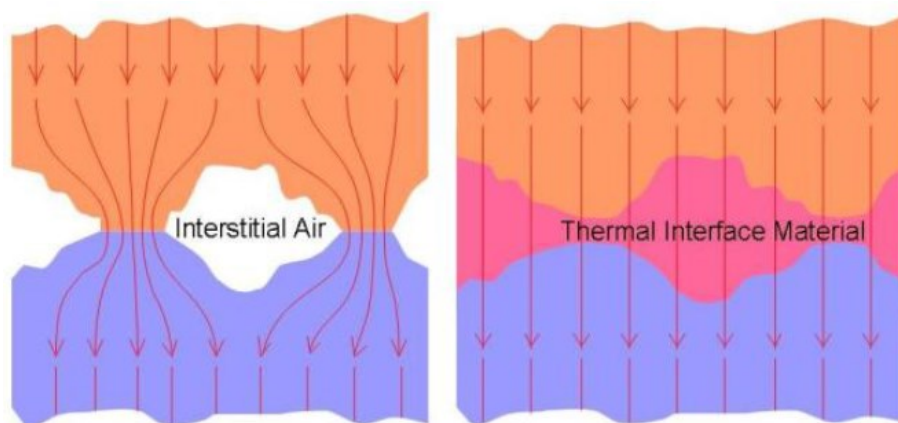
Kovové jádro (z anglického a odborného termínu metal core), na němž je umístěna keramická vrstva spolu s čipy, slouží k odvodu tepla od čipu. Takto můžeme danou led rozsvítit, ovšem nemůžeme ji běžně provozovat. Z toho důvodu musíme celou sestavu umístit na chladič, aby byla zajištěna tepelná výměna mezi čipy a okolím. K tomu, abychom mohli led umístit na chladič, potřebujeme stykovou plochu, tu zajišťuje tzv. metal core, což je spojení mezi chladičem a led čipy a tímto tvoří tepelný odpor mezi chladičem. Zmiňovaný tepelný odpor metal core $R_{th JB}$ je uváděn od 2,1 K/W do 6,6 K/W pro řadu Ostar headlamp, dále je vylepšená verze Ostar headlamp PRO u něhož je rozsah 1,6 K/W až 3K/W [11]

3.2.2 Osazení LED na chladič

Osazení LED na chladič je nedílnou součástí při vývoji a konstrukci optického systému s LED. Pouzdro se osazuje na tzv. piny (jsou to vodící kolíky, které vystředí pouzdro) a poté se připevní k chladiči. K upevnění můžeme použít několik metod, těmi jsou: šroubové spoje, klipy, lepidlo atd. To vše přináší do procesu počítání optiky odchylky, které mají vliv na celkový výstup z optického systému, proto se určují tolerance, v nichž se musíme pohybovat, aby nedošlo k degradaci optického výstupu. K tomu se v praxi využívá tzv. toleranční analýza určující, jak velké odchylky mohou nastat, aby nedošlo k degradaci optického výstupu.

Při upevnění LED na chladič za pomoci šroubových spojů, je podmínkou výrobce, použití šroubů maximálně M3, nebo menšího rozměru s podložkou, dále se fixuje závit proti povolení, dotahovací moment se volí 0,5 Nm. Musíme dávat pozor na to, že nesmí dojít k poškození keramické destičky. Upevnění pomocí klipů má podobná doporučení. Dalším možným způsobem je osazení pomocí lepidla, avšak zde je důležité, aby lepidlo mělo dobrou přilnavost k materiálu chladiče a zajistilo se dobré tepelné vedení.

Pro správnou činnost LED je dobré dbát na to, aby docházelo k dobrému tepelnému styku s povrchem chladiče a nedocházelo k soustředěným tepelným bodům vlivem nerovnoměrného tepelného rozvodu. To je způsobeno tím, že povrch chladiče není nikdy dostatečně rovný, jeho struktura má mikroskopické propadliny a ke styku dochází pouze na vrcholcích. Dutiny, které nejsou spojeny, tvoří vzduchové kapsy. Tyto kapsy se eliminují použitím teplo vodivé pasty, která se dá mezi chladič a kovové jádro LED, aby se výrazně snížil tepelný odpor a zvýšil tepelný tok mezi plochami. Pokud bychom toto nedodrželi, tak by docházelo k tepelnému namáhání polovodičového čipu, ten by rychleji stárnul a degradovaly by jeho vlastnosti, popřípadě by úplně přestal fungovat. Na obrázcích můžeme vidět, jak dochází k přenosu bez pasty a s pastou, vlevo na obrázku je možno vidět již zmiňované vzduchové kapsy a koncentraci v oblasti vrcholů póru v materiálu. Na pravé straně je vidět použití pasty a následný lepší přenos tepla od LED na chladič. Nemusíme vždy používat pastu, dá se využít i speciální fólie, která také plní funkci lepšího tepelného přenosu. [11]



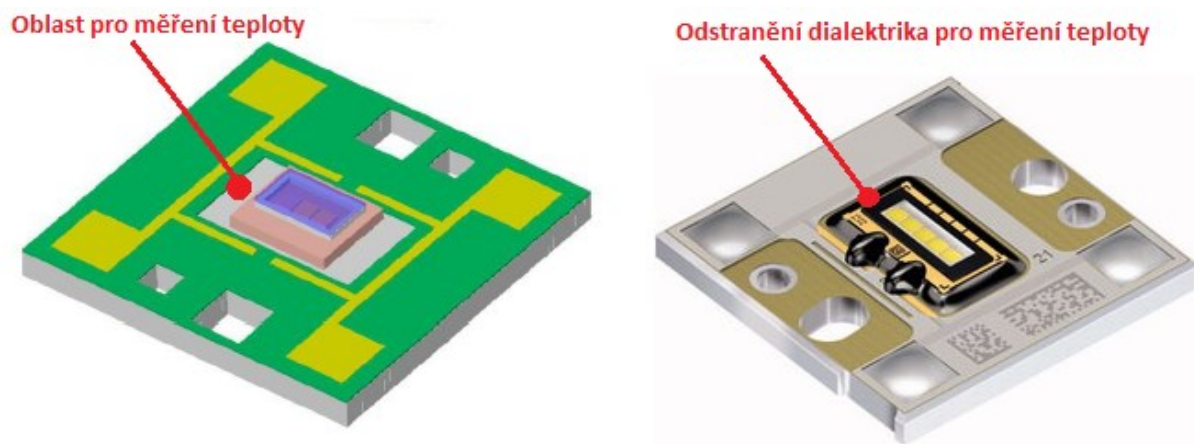
Obr. č. 10 Tepelný přenos mezi LED a chladičem [11]

3.2.3 Tepelný management LED OSRAM OSTAR

Při návrhu nebo konstrukci hlavního světlometu v praxi se potýkáme s tepelnými problémy LED. Co to znamená? Dochází k poklesu světelného toku, který LED dioda vyzařuje a celý design se musí optimalizovat na určitý světelný tok, který je ponížen o tepelné ztráty (padání), degradující vyzařovaný světelný tok. V kapitole věnované přímo praktickému návrhu a měření reálného vzorku si více popíšeme a ukážeme, jaký vliv má teplota na degradaci světelného toku.

Doporučení výrobce OSRAM OSTAR je, aby jakýkoliv design s použitím multi čipové LED, byl ověřen v praktickém prototypu, a to kvůli již zmiňované degradaci světelného toku. Ověření by se mělo co nejvíce přiblížit skutečnému pracovnímu prostředí s veškerými okolními zdroji světla, např. denní svícení, blinkr atd. Jednotlivé čipy jsou umístěny na desce, abychom docílili výpočtu teploty T_j (teplota přechodu). Je nutné, abychom jako základní teplotu zvolili teplotu desky T_B . Součástí hodnoty T_B je také započten tepelný odpor mezi deskou a LED module (multi-čip).

Měření teploty nemůže být provedeno přímo na spodní straně destičky, z toho důvodu, že celý modul je vždy připevněn na chladícím prvku (chladič), mezi který nemůže být vloženo žádné měřicí zařízení. Na základě toho musíme použít alternativní řešení, a to takové, které bude probíhat na horní straně vedle keramické destičky s jednotlivými LED čipy. Na obr. č. 11 lze názorně vidět, kde můžeme provést měření teploty modulu LED. K tomuto účelu je vytvořené okénko (šedá vyznačená ploška), umožňující nám provést měření teploty. [11]



Obr. č. 11 Oblast pro měření teploty[11]

Výrazná komplikace dochází v případě, kdy jsou použita pouzdra, obsahující maximální počet led čipů, a to 4 až 5. V této kombinaci musí být odstraněné černé dielektrikum. Oblast je o hodně menší a může dojít k poškození čipů a tím i ke zničení celé LED diody.

Vzorec pro výpočet teploty přechodu T_j :

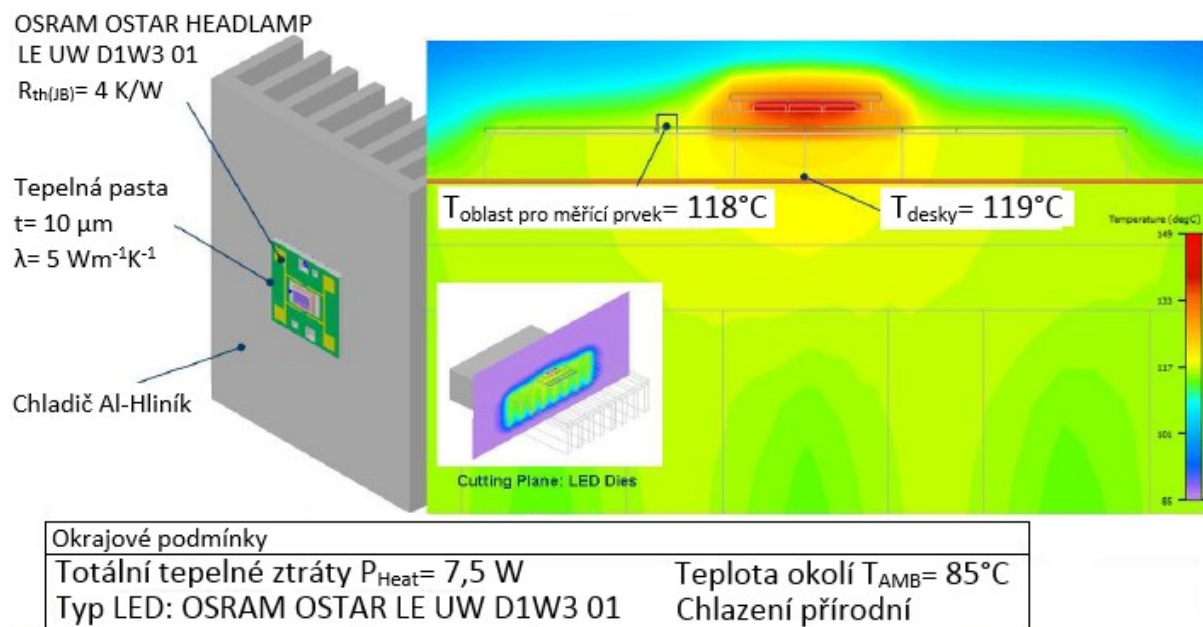
$$T_j = R_{th(JB)} * P_{Heat} + T_{Mounting Location}$$

$R_{th(JB)}$ – tepelný odpor mezi přechodem a deskou

P_{Heat} – tepelné ztráty čipu

$T_{Mounting Location}$ – teplota oblasti pro měřicí prvek

Na obrázku 12 můžeme vidět teplotní simulaci od firmy Osram, na níž lze vyčíst, že teplota desky je opravdu (vedle keramické destičky) totožná s teplotou na spodní straně diody, rozdíl je cca 1°C. Takovým způsobem se LED dioda chová i v reálném provozu. [11]

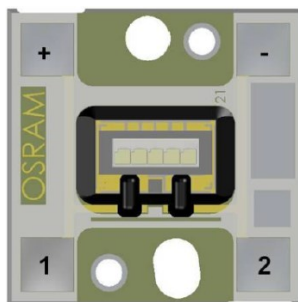


Obr. č. 12 Tepelná simulace[11]

V dalších kapitolách věnovaných praktickému měření reálného vzorku jsem se zaměřil na degradaci světelného toku při různých teplotách.

3.2.4 Připojení LED

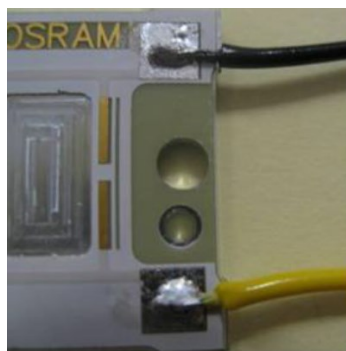
LED dioda se připojuje vždy ke kladnému a zápornému pólu napájecího zdroje. U multi čipových led tomu není jinak, a proto jsou v rozích vytvořeny dvě čtvercové plošky, které jsou předcínované pro snadnější pájení. Na obrázku jsou ukázány oblasti, k nimž se připojuje napájení. Jedná se o plošky (piny), které jsou označeny jako + (1) a – (2). Plošky mají velikost 3,5 mm na 3,5 mm.



Obr. č. 13 Plošky (pinů) pro napájení [11]

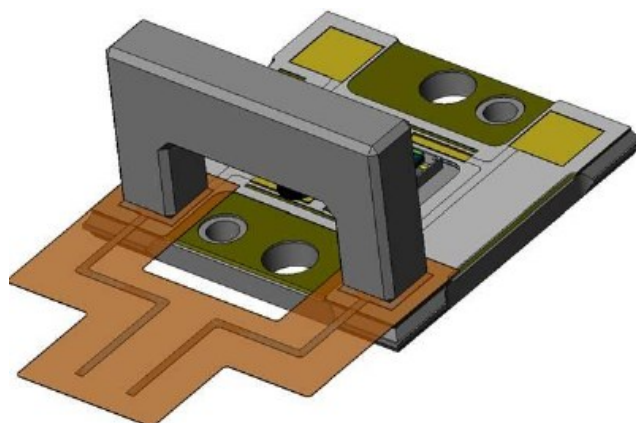
S napájením také úzce souvisí, jakou metodou bude na pocínované plošky napětí přivedeno (zapájeno). Vhodný výběr metody závisí na tom, kde se daná LED bude používat a v jakých podmínkách. Někdy se totiž musí přivést napájení přes krkolomné šterbiny. V následujících odstavcích budou popsány 3 základní metody připojení napájení k LED modulu.

První metodou je klasické připojení pomocí vodičů, které jsou přímo napájeny k ploškám modulu. Jedná se o nejjednodušší metodu připojení napájení k modulu, ovšem z pohledu sériové výroby, se tato metoda takřka nedá použít, a proto je potřeba zvolit metodu jinou. Je vhodná k prototypovému zkoušení, nebo také k velmi malé, či omezené výrobě. Metoda spočívá v použití odizolovaného vodiče s maximálním průměrem 1,02 mm. U tohoto způsobu pájení se doporučuje teplota kolem 350°C a doba prohřátí a zapájení konce vodiče, by měla být cca 5–6 sekund, poté by se mělo odložit pájecí zařízení a spoj nechat vychladnout, aby nedošlo k poškození čipu. Ploška již obsahující film cínu a pocínovaný konec vodiče, by měl být ze stejného materiálu SnAgCu. Obrázek č. 14. ukazuje, jak vypadá správně zapájený LED modul. [11]



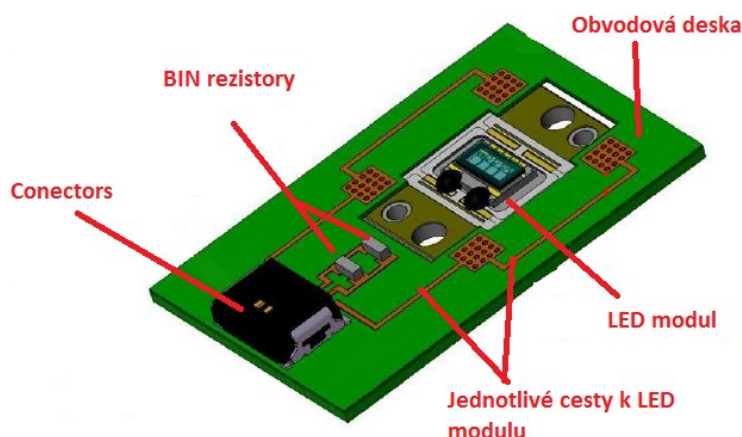
Obr. č. 14 Ukázka zapájených plošek [11]

Druhým způsobem, kterým se dá připojit napájení k modulu LED, je spojení pomocí flexi pásku, jedná se o pružné PCB (ohebný pásek) s vodivou cestou. Flexi pásek je složen z vrstvy polaymidu, který má tloušťku 25 μm nebo 50 μm . Jeho výroba je podobná výrobě desky plošného spoje. Další možnou variantou je výroba pomocí osvitů, kdy se vyleptá cesta a následně se nastříhá pásek na potřebný tvar či délku. Připojení FPC k modulu ledky se provádí pomocí shodné plošky, která je na modulu a stejně tak i na FPC. Poté se FPC a modul nasměrují proti sobě a dojde k zapájení kontaktů. Zapájení se provádí horkým plochým hrotem ve tvaru podkovičky, ukázku je možno vidět na obrázku č. 15. Pájení trvá cca 3 s teplotou 350°C. Výsledný spoj je pružný a ohebný. Tento typ pájení je vhodný pro sériové kusy, jelikož je detekce správnosti zapájení na velmi dobré úrovni.



Obr. č. 15 Zapájené plošky pomocí FPC [11]

Třetím druhem spojení LED a připojení napájení je mnohem složitější. Modul je připojen (osazen) na obvodovou desku, k níž jsou plošky připájeny. Tento způsob je výhodný, protože dochází k lepší stabilitě modulu a navíc je možno obvodovou destičku využít i pro připojení konektoru a dalších věcí, jako třeba binovací odpory, které určují, jak bude LED modul svítit. Tento způsob je rozšířen, neboť se LED modul stává kompaktním systémem, který je možno použít i do jiných zařízení, či světelných modulů. Ukázka osazení LED modulu na obvodovou destičku lze vidět na obrázku č. 16. [11]



Obr. č. 16 LED modul na obvodové destičce [11]

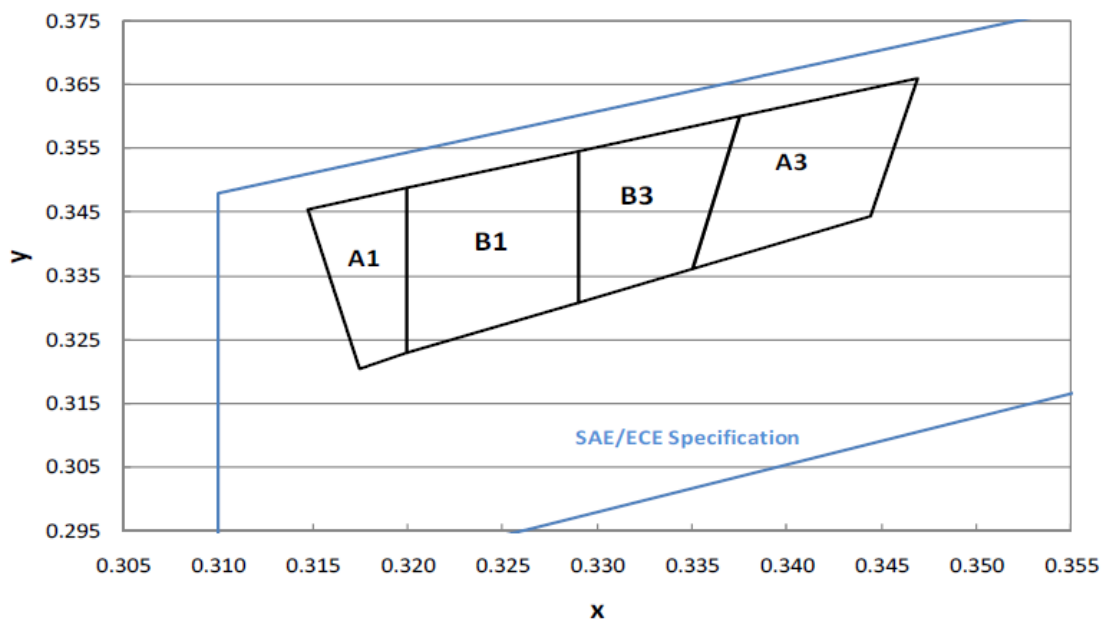
4 Binování LED diod

Binování led diod je velice důležité, jelikož při vývoji musíme dbát na to, aby jednotlivé diody svítily stejně. Například: pokud je světlomet složen z více modulů používající různé led diody od jednoho výrobce např. 4chip a 2chip, musíme u této kombinace zajistit, aby byly biny jednotlivých led podobné (př. aby v barevném podání svítily stejnou barvou). K tomuto třídění se využívají již zmiňované jednotlivé biny led diod. Výrobci led diod neustále pracují na zkvalitňování a vylepšování jejich výroby. Ta se řídí statistickým rozložením dle Gaussovy vícerozměrné křivky, podle níž se vyrobí velké množství čipů s různými vlastnostmi. Z výrobního hlediska není možné dostat dvě identické součástky, z tohoto důvodu se udává bin. Máme-li jeho danou hodnotu (př. barevná teplota), jedná se vždy o střed tolerančního pásma daného parametru.

S touto problematikou úzce souvisí konstrukce diody, skládající se z PN přechodů, které jsou epitaxně vyrobeny na p nebo n typu substrátu. Pásmová mezera materiálu poté určuje vlnovou délku LED čipu. Vlnová délka se pohybuje od IR (infračervené) až po UV (ultrafialové) záření. LED dioda proto může generovat širokopásmový světelný výstup. Výroba led diod je vysoce rafinovaný proces, kdy tepelný koeficient mezi epitaxními vrstvami a substrátem může vést k vyvolání různých defektů. Tyto poruchové defekty mohou způsobovat díry a elektrony, které kombinují non radiačně na PN přechodu, což může vést ke snížení vyzařovaného světelného toku. Tento jev, pokles světelného toku, je možné zaznamenat i u LED diod, které jsou vedle sebe na stejném typu substrátu. Výrobci třídí LED diody podle světelného toku nebo podle chromatičnosti (pro bílé LED) a barvy (pro barevná zařízení), lze jej vyčlenit binováním. Správný výběr LED pomáhá jak výrobcům, tak i zákazníkům a zároveň můžeme mít představu o výstupních charakteristikách.

4.1 Barevné třídění

Pro starší typy světelných zdrojů vznikl normativ CIE 1931 pro třídění. U LED je třídění prováděno dle jednotlivých specifikací výrobců, ovšem všichni se řídí standardem ANSI C78.377A LED. To znamená, že v jednom balíku stejného binu by měly být cca všechny LED stejné (s malými odchylkami v rámci tolerance). Jak je možno vidět na obrázku, jednotlivé biny jsou zobrazeny v tabulce a ohraničeny čtvercem. Tyto čtverce v podstatě odpovídající korelované teplotě barvy (CCT), čtverce napodobují bílé světelné zdroje v rozsahu od bílé až po chladnou teplou bílou. Čím menší jsou biny, tím více konzistentní výkon záření led dioda poskytuje. Separace je velice přesná, odlišnosti v jednom binu jsou velice malé (v řádech setin), to zapříčiňuje možnost uživatele si vybrat tu diodu, která vyhovuje jeho požadavkům i požadavkům designu. Na obrázku můžeme vidět třídění (binování) dle světelných veličin, jako je například svítivost. Graf pochází od jednoho z největších výrobců led diod Lumileds, od této firmy je také použita dioda v demonstračním modelu pro tuto práci. [8, 9]



Obr. č. 17 Binování od firmy Lumileds [9]

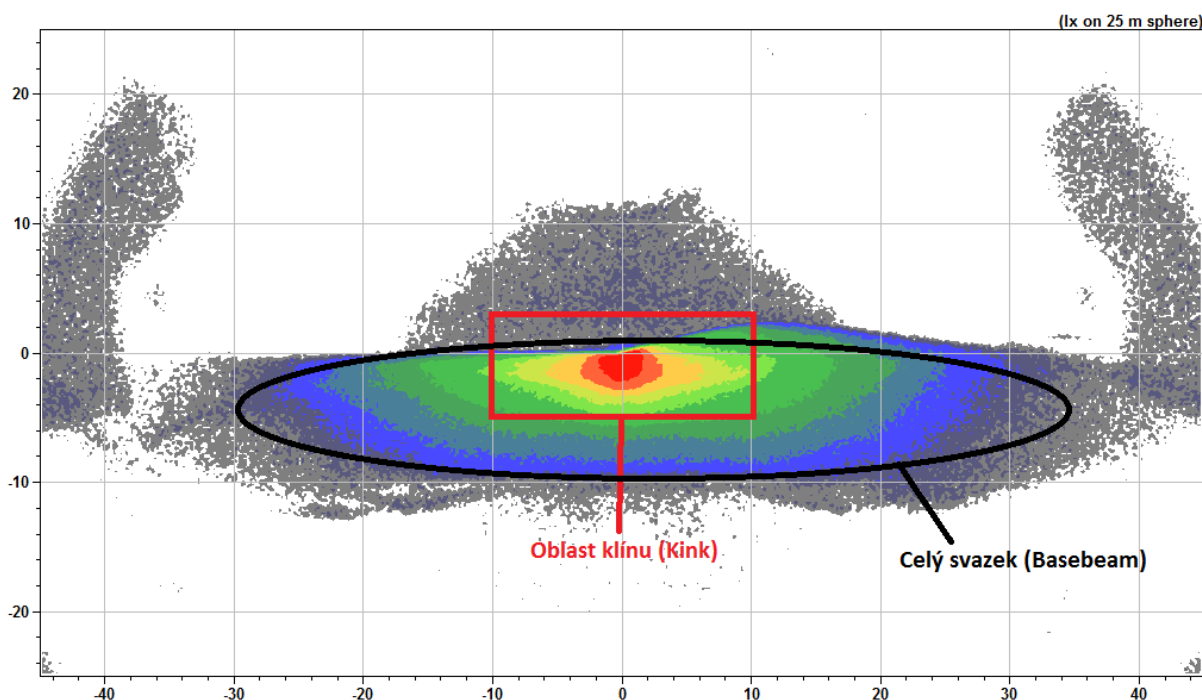
Pokud se blíže zaměříme na obrázek, uvidíme modré ohraničení. To nám znázorňuje evropskou a americkou specifikaci barvy diod, které mohou být použity pro hlavní funkce světlometu. Pokud by se diody svou barvou nevešly do vyhraničených hodnot barvy, nesmějí být použity pro hlavní funkce ve světlometu. Správně zvolená barva diod hraje velkou roli v tom, jakou barvu bude mít celkový svazek na vozovce, navíc je barva také důležitá pro homologační předpis. Ten nám stanovuje, jaká může být maximální dovolená barva celkového svazku. Při použití LED diod v projektorovém systému (systém použitý pro konstrukci vzorku), vzniká problém s barvou, jelikož z fyzikálních důvodů je svazek posunut více do modré barvy než u xenonového a halogenového světlometu (projektoru). Více o projektorovém systému bude objasněno v kapitole zabývající se návrhem a praktickou realizací funkčního vzorku.

Jak již bylo zmíněno, výrobci třídí diody nejen podle barvy, ale také podle toho, jak diodám kolísá vyzařovaný světelný tok. Ten je při návrhu velice důležitý, neboť z něj vyplývají celkové vlastnosti světelného svazku. Proto výrobci LED diod implementují informace o jednotlivých binech do datasheetu, z důvodu lepší přehlednosti. V datasheetu je vždy uvedený seznam vyráběných binů pro daný typ LED, například 2 čipová LED dioda bude mít celkem 5 binů, ze kterých si můžeme vybrat ten, jenž bude plnit naše požadavky. Biny jsou řazeny do kódů pro lepší přehlednost. Například skupina binů z kódu H má udávaný minimální tok 350 lm a maximální tok 425 lm, to je velké rozpětí, proto se bude skupina H ještě dělit na další podskupiny, které zmenší celkový rozptyl světelného toku. [8, 9]

5 Použití více čipové LED v optických systémech

V automotive se více čipové LED využívají především hlavním světlometu pro funkce potkávacího a dálkového světla. Tato oblast se v poslední době velmi dynamicky rozvíjí a více čipové LED se nasazují proto, aby měl světlomet dostatečný výkon a uspokojil požadavky zákazníka, které mnohdy překračují fyzikální zákony. V této kapitole bude objasněno, proč se více čipová LED používá a co vše může ve světelném svazku ovlivnit. S touto oblastí je, také velmi úzce spojeno, v jakém optickém konceptu bude více čipová LED použita. Mezi základní patří konvenční systém s parabolovými odražeči a projektorový systém, jenž můžeme dále dělit na direct a indirect (LED svítí napřímo do čočky nebo do odražeče a poté do čočky).

Abychom mohli pokračovat v této kapitole, musíme si objasnit, jak vypadá světelný výstup z hlavního světlometu v potkávací funkci. Jako příklad si vezmeme velice známý evropský svazek, na němž si vysvětlíme jednotlivé oblasti. Svazek se kvalitativně posuzuje na základě horizontálního rozptylu, celkovým tokem a maximem. Paradoxně není nikde definováno, jakých minimálních hodnot by měl svazek dosahovat, nýbrž jsou zde pouze vymezeny standardy, pod které by hodnoty neměly klesnout. Největší vliv má na celkový výkon zákazník, který udává, jakých hodnot by měl světelný svazek dosahovat.

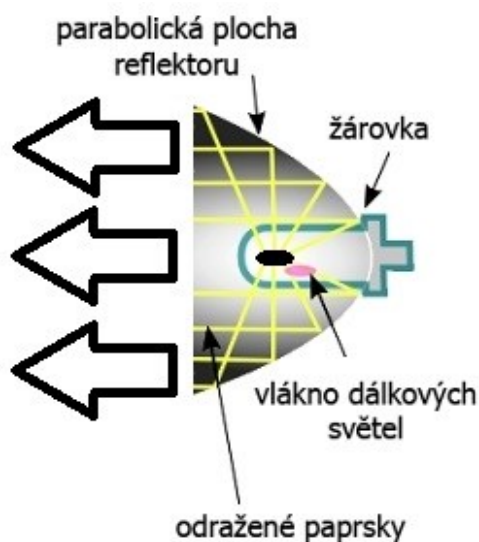


Obr. č. 18 Potkávací evropský svazek

Oblast klínu (kink) dělá maximum svazku spolu s klínem a druhá část nazvaná jako celý svazek (basebeam) tvoří v podstatě celý svazek bez klínu a bez maxima a má rovnou hranici - spojením těchto dvou částí vznikne celý svazek. Tohle složení svazku platí, pokud je tvořen dvěma moduly (paraboly). Druhá varianta je, že celý svazek tvoří jeden modul (parabola).

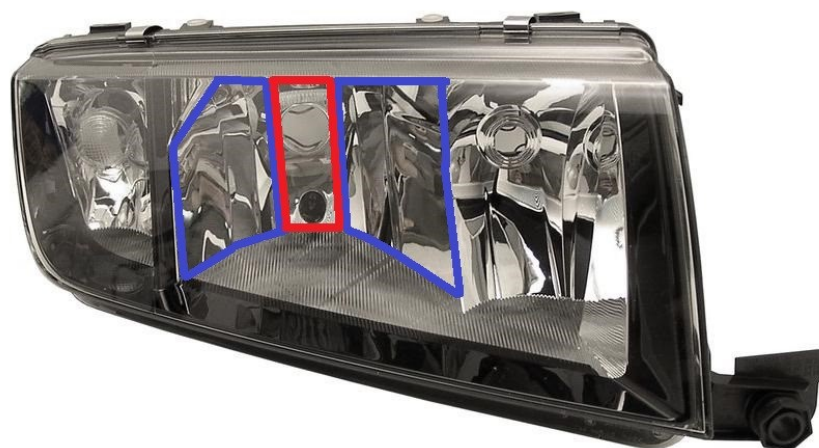
5.1 Parabolový systém

Základem celého systému je klasická parabola o určitém ohnisku. Do ohniska se vkládá světelný zdroj, v případě žárovky se jedná o vlákno a u LED diody to je ploška čipu vyzařující světlo. Hlavní funkcí paraboly je odrazit veškeré paprsky světelného zdroje rovnoběžně z paraboly ven. V podstatě to, co vidíme na vozovce, je poskládaný obraz vlákna tak, jak se odráží. Starší typy světlometů měly pouze parabolu, a aby bylo světlo správně směřováno, využívala se k tomu tzv. optika na skle (světlomety s nečirým krycím sklem). Aby mohlo dojít k odrazu světelných paprsků, je zapotřebí na parabolu nanést kovovou vrstvu, která zaručuje 80% odrazivost všech paprsků. Na obrázcích lze vidět, jak funguje parabola s halogenovou žárovkou. U LED musíme vzít v potaz to, že můžeme využít pouze polovinu paraboly, jelikož dioda má světelný rozptyl 180° a spodní část by tímto byla nevyužita. Proto se využívá pouze polovina a druhá polovina je odříznuta, což umožní vytvoření kompaktnějšího systému, než konvenční systémy s halogenovými žárovkami.



Obr. č. 19 ukázka funkce paraboly [10]

Další vývojový stupeň parabolových světlometů byly free-form reflektory, jsou to rozsekané části parabol tvořící úzké pásy. U tohoto systému není zapotřebí mít optiku na skle, světlomety můžeme znát také pod názvem čirá optika. Na obrázku můžeme vidět komoru pro potkávací funkci a plochu rozdělenou na tři oblasti. Červená oblast tvoří střední část svazku a je to oblast s největší intenzitou na cestě, tvoří tak maximální dosah celého světelného svazku. Modré oblasti svazek dotváří a vytváří tak kraje svazku a utvářejí jeho šířku. Zajímavostí je, že modré oblasti svítí do kříže. Levá část svítí do pravé strany a pravá část do levé strany. [10]



Obr. č. 20 Světlomet typu free form

Ukázkovým příkladem, na kterém si můžeme demonstrovat parabolový systém s využitím více čipových LED, je světlomet od Jaguáru XF, vyrobený firmou Varroc. Aby byl světlomet schopen vytvořit evropský svazek charakteristický svým klínem, musíme složit více parabol tak, aby tento svazek odpovídal jak homologačním předpisům, tak požadavkům zákazníků. Jak je možno na obrázku vidět, je zapotřebí více parabol. První zleva je označována jako Kink a vytváří hlavní střední část svazku. Druhá sada parabol se označují jako tzv. Basebeam a vytváří konce svazku s nižšími intenzitami, viz popis světelného svazku na začátku kapitoly. [10]



Obr. č. 21 Full led světlomet

5.2 Projektorový systém

Tento systém se vyznačuje absencí viditelnosti odražeče, stejně tak, jako u parabolového systému, a to z toho důvodu, že je projekční systém složen z již zmiňovaného odražeče, clonky a čočky. Projektor je konstruován jako modul, a to buď monofunkční, nebo bi-funkční. Monofunkční má pouze jednu funkci, v případě hlavního světlometu tvoří potkávací funkci. Bi-funkční má více funkcí, povětšinou se jedná o kombinovaný systém potkávacího světla a světla dálkového. Modul ve srovnání s parabolovým systémem má mnohem menší rozměry a je více účinný, v minulosti byly projektory v automobilech vidět méně než dnes. Bylo to z toho důvodu, že projektor se nacházel většinou ve vyšších řadách automobilů, které byly dražší a méně dostupné. Dnes je tomu jinak – zákazníci si čím dál častěji přejí projektory pro svou lampu, neboť se dá pomocí modulů, vytvořit velice zajímavý design. Jako příklad můžeme zmínit nový Land Rover Evoque, vyrobený firmou Varroc Lighting, kdy tento modul je velice futuristický – sdružuje totiž mnoho funkcí v jednom kompaktním modulu. Z toho vyplývá oblíbenost těchto modulů. Více podrobností o projektorovém systému bude objasněno v následující kapitole, která se bude věnovat návrhu a konstrukci projektoru, dále bude detailně vysvětlen princip návrhu a funkce modulu. Na obrázku můžeme vidět světlomet s typickým projektorovým modulem, který pochází z vývojové dílny firmy Varroc a byl navržen pro vozidla Ford Focus. [10]



Obr. č. 22. Světlomet s projektorem

6 Návrh a konstrukce projektorové jednotky pro potkávací a dálkovou funkci

Tato kapitola bude zaměřena na praktickou konstrukci projektorové jednotky. Zejména se bude jednat o návrh reflektoru, clony, čočky, optimalizace chladiče a určení správného proudu pro plnění fotometrických bodů, které musí jednotka splňovat při homologační proceduře.

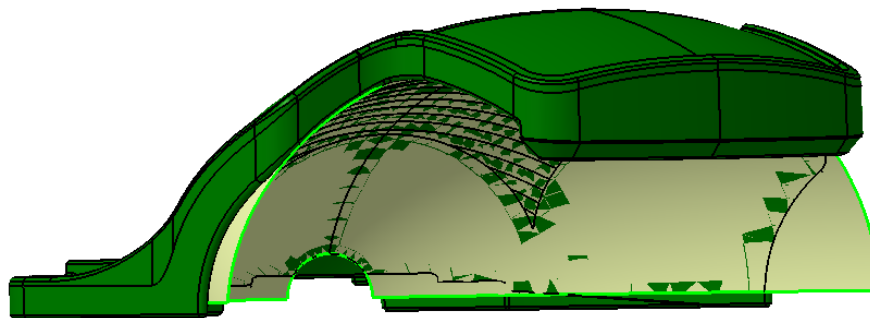
6.1 Hlavní části projektoru pro potkávací funkci

Projektorová jednotka je specifický prvek v osvětlovací soustavě automobilu. Ve většině případů se jedná o kompaktní modul, jehož účelem je vytvářet určitou funkci. V této práci se bude jednat o jednotku, která v automobilu plní funkce potkávací / dálkové světlo. Tyto funkce patří mezi tzv. hlavní funkce světlometu a umožňují uživatelům (řidičům) dobrou orientaci při jízdě v noci. V následujících odstavcích bude vysvětleno, jakou funkci v celém systému zastávají jednotlivé díly.

6.1.1 Reflektor

Mezi hlavní části celé jednotky patří reflektor, bez něhož by jednotka nemohla svítit. V projektoru se jedná o druh tzv. eliptický odražeč, který je specifický tím, že má dvě ohniska. V prvním ohnisku je umístěn světelný zdroj, v našem případě se jedná o dvou čipovou led diodu od firmy Lumileds. Světelný zdroj je nasměrován tak, aby osvětloval celou plochu odražeče. Odražené paprsky jsou poté odraženy do druhého ohniska, v němž je umístěna clona (bude objasněno v následující podkapitole). Odraz paprsků od odrazné plochy reflektoru je dána Snelovým zákonem odrazu. Při dopadu paprsku na plochu reflektoru dochází k odrazu, ovšem odraz paprsku není 100%, nýbrž pouze 80%, proto lze říci, že reflektor má povrchovou odrazivost 80 %, zbylých 20 % energie je zmařeno ztrátami odrazem. Odrazivost povrchu odražeče je dána jak použitou technologií nanesené vrstvy tak i její kvalitou. Pro sériovou výrobu je standardně používána 80% odrazivost, která je všeobecně dostačující.

Na obrázku 23 můžeme vidět reflektor napočítaný pro tuto práci. Jedná se pouze o část eliptického odražeče, protože led dioda vyzařuje v úhlu 180° nikoli 360° , tedy tak, jak je to u halogenových, či výbojkových zdrojů světla. Tato plocha (budoucí odražeč) nám výrazně ovlivňuje celkový charakter světelného svazku. Touto plochou dokážeme řídit homogenitu (čistost), horizontální a vertikální rozptyly a také rozložení intenzit osvětlení celého svazku. V kapitole věnující se simulaci výstupu z projektoru bude ukázáno, jak jsou intenzity ve svazku rozděleny. Pokud je reflektor vyladěný, předává se dále - mechanickému týmu, který vyhotoví mechanické prvky tak, aby byla součást výrobitelná a dala se poté uchytit na příslušný díl.



Obr. č. 23 Reflektor projektoru - původní plocha (žlutá), ořezaná pro formu (zelená)

Nyní si objasníme, jak reflektor vzniká vzhledem k teoretické elipse. Elipsu si můžeme představit jako uzavřenou křivku v rovině. Veškeré body na elipse mají stejný součet vzdáleností vůči dvěma zvoleným ohniskům. Elipsu řadíme mezi tzv. kuželosečky.

Rovnice elipsy:

- kanonický tvar: rovnice elipsy je v normální poloze (hlavní ose bude rovnoběžná s osou x a středový bod je udáván souřadnicemi $[x_0, y_0]$, který odpovídá rovnici

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1$$

- Pro kartézský souřadnicový systém můžeme psát rovnici pro elipsu se středem v počátku

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1$$

a – délka hlavní poloosy

b – délka vedlejší poloosy

$[x_0, y_0]$ – libovolné body na elipse

- Veličina e je tzv. excentricita elipsy a vyjadřuje vzdálenost ohnisek od středu elipsy, její rovnice je:

$$e = \sqrt{a^2 - b^2}$$

- Elipsu lze vyjádřit také pomocí parametrických rovnic:

$$x = a \cos t$$

$$y = b \sin t$$

Jak již bylo řečeno, elipsu řadíme mezi tzv. kuželosečky, a to z důvodu toho, že ji lze zkonstruovat jako řez rotační kuželové plochy rovinou. Jakákoliv přímka, která prochází středem S elipsy je také průměrem. Máme dva na sebe kolmé průměry m a n , za pomoci trojúhelníkové konstrukce můžeme sestavit sdružené průměry m_a a n_a . Těmito průměry prochází rovnoběžky, které se stanou

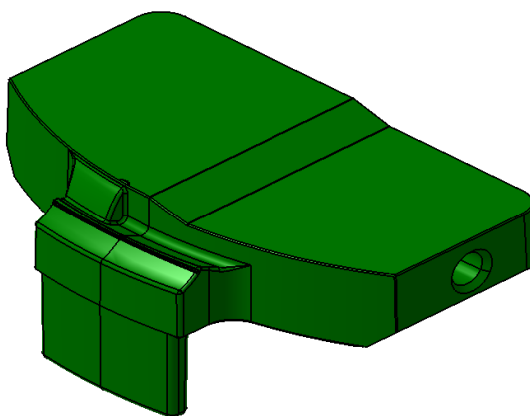
tečnami elipsy a vytvoří tak rovnoběžník. Tyto dva sdružené průměry, které jsou na sebe kolmé, určují osu elipsy. Průměry, jež jsou omezeny body ležícími na elipse, určují elipsu.

Odrazová vlastnost elipsy a kterou využíváme u konstrukce reflektoru. Eliptické zrcadlo (odrazová plocha) obsahuje v jednom ohnisku zdroj světla (LED). Všechny vyzařené paprsky se podle zákona odrazu odrazí do jednoho bodu, v němž je druhé ohnisko elipsy, kde leží clona ořezávající světelný svazek.

6.1.2 Clona

Clona u tohoto systému zastává jednu z hlavních funkcí, jelikož určuje, jak bude svazek vypadat. Jejím cílem je clonění (ořezání) výstupu z reflektoru, tak aby svazek měl charakter např. evropského svazku. Můžeme také řídit množství propouštěného světla z projektoru a tím ovlivňovat celkový výstupní tok. Clona může být jednoduchá jako plíšek, ovšem může být i složitější tzv. objemová clona, která je použita i u projektorové jednotky v této práci. U objemové clony můžeme počítat také 80% odrazivost na jejím povrchu, to pomůže vylepšit vlastnosti svazku (zvětšit tok a maximum), nebo pomoci při ladění specifických bodů během fotometrické zkoušky. Součástí objemové clony může být tzv. třetí pásmo, to je důležité, neboť během jízdy v automobilu osvětluje dopravní značky u vozovky. Jedná se o světlo, které má velmi malou intenzitu, v Evropě je omezena na hodnotu 1 lx. Na obrázku clony můžeme vidět červeně zakroužkovanou oblast tvořící tzv. třetí pásmo, které však nemusí být využito na clonce. Plošky mohou být vytvořeny také na čočce, ovšem to si objasníme v následující podkapitole.

Náš projektor bude evropského typu, proto si musíme udělat základní návrh ořezu tak, aby splňoval evropské požadavky. To uděláme jednoduše v příslušném editoru software Catia. poté, co je clona v cad software vyhotovená, můžeme ji vložit do simulace a celý systém simulovat. Pokud máme problém s nějakými fotometrickými body, lze je doladit pomocí editace skici. Tu vidíme na obrázku, kde je ukázáno, jak se ořez ladí – tedy: jedná se o naladění levé strany svazku, čili pravá strana clony. Její vertikální pozice má být $0,57^\circ$ dole.



Obr. č. 24 Clona projektorové jednotky evropská verze

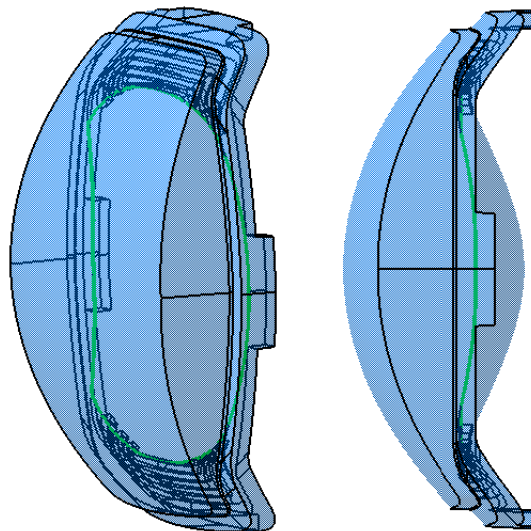
6.1.3 Čočka

Tato součást nám promítá celkový výstup z reflektoru ořezaný clonou na vozovku. Čočka dokáže obrátit obraz, proto při průhledu reflektorem - pravá část na cloně je na čočce zobrazena na levé straně a na druhé straně clony (pravé) je to naopak. Čočka má také své ohnisko, které je umístěno do druhého ohniska reflektoru, proto má na kvalitu světelného výstupu velký vliv jakost její výroby. S výrobní kvalitou také souvisí, z jakého materiálu je čočka vyrobena. Dnes se používají materiály plastové, a to z důvodu toho, že čočky mají velmi složitý tvar, který si většinou určuje zákazník, a proto se dnes můžeme setkat např. s čočkami obdélníkovými. V minulosti se u halogenových a výbojkových systémů používaly jednoduché kulaté čočky, které byly vyráběny ze skla.

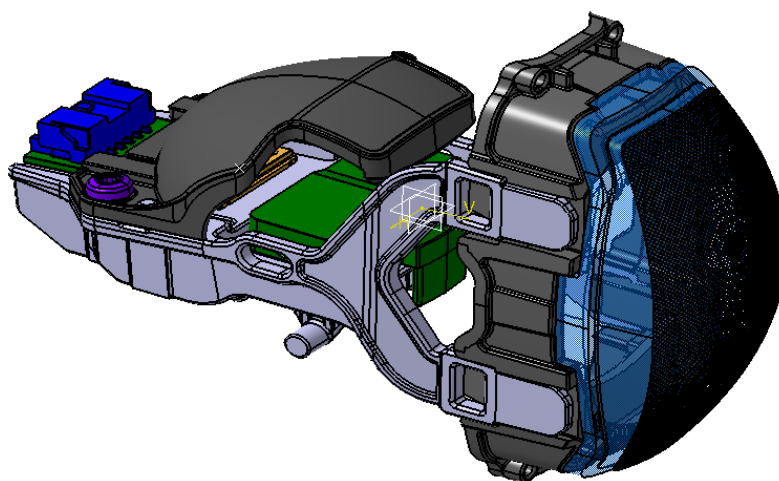
V této práci je čočka díky svému tvaru zhotovena z plastu typu PMMA. Jedná se o čirý plast, který má lepší vlastnosti než klasické PC. Materiál PMMA je velice odolný proti tzv. žloutnutí. Na obrázku můžeme vidět, jak vzniká čočka - pomocí software si určíme parametry - jako druh materiálu, tloušťku čočky, ohnisko, v němž je čočka umístěna a poté čočce určíme rozptylové funkce tak, aby byl svazek homogenně rozptýlen. Materiál je důležitý z toho důvodu, že každý má svůj vlastní index lomu. U PMMA je to přibližně 1,492. Poté, co si určíme tyto základní parametry, dostaneme dvě plochy, jsou to tzv. asféry, které vytváří celkové vlastnosti čočky. Po získání těchto ploch je ořízneme do tvaru, který potřebujeme. Dalším krokem je předání dat mechanickému týmu dodávající čočce zbytek vlastností tak, aby byla vyrobitelná a dala se namontovat do držáku čočky.

V této kapitole jsme si objasnili, jak vypadají jednotlivé díly našeho projektoru pro tuto práci. Na obrázku můžeme vidět celkový pohled na reálný projektor v 3D modelovacím software Catia a reálný vzorek, který je totožný s virtuálním. V kapitole věnující se simulaci celého systému uvidíme celkový pohled na optický výstup z této projektorové jednotky. V kapitolách věnující se jednotlivým dílům byl detailně popsán návrh jednotky pro funkci potkávacího světla, následně bude objasněno, jak lze tuto jednotku modifikovat na funkci dálkového světla.

V dalších odstavcích bude popsáno, jak bude vypadat úprava projektorové jednotky, aby mohla zastávat funkci dálkového světla.



Obr. č. 25 Čočka projektoru



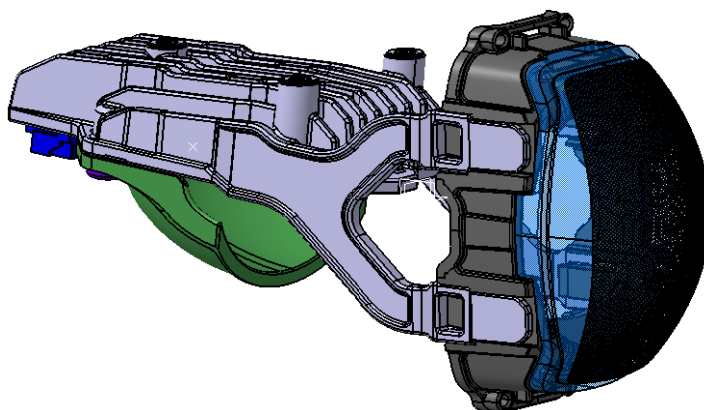
Obr. č. 26 Projektorová jednotka (potkávací funkce)

6.2 Úprava potkávací jednotky na dálkovou

Modifikace nebude nijak složitá, jelikož principiálně bude modul stejný, jako modul pro potkávací funkci, až na pár detailů, které lze vidět při detailním pohledu. Hlavní rozdíl je ve výstupním světelném svazku, který je úplně jiný než u potkávací funkce.

U modulu pro dálkovou funkci je nejdůležitější, aby měl velké světelné maximum, jelikož musí svítit hodně do dálky. Modifikace proto bude spočívat v přemodelování plochy reflektoru, to se udělá tak, že se více zkoncentruje maximum a odstraní se některé rozptyly, aby zbytečně nesvítily tam, kam nepotřebujeme.

Další modifikací je úplné odstranění clony, jelikož není žádoucí, aby byl svazek nějak ořezáván. Naopak – potřebujeme co nejvíce světla pustit do bodu HV, pro představu je to zhruba bod (0,0) v x, y souřadnicích. Poslední součást čočka zůstane bez změny, což je velice výhodné jak pro budoucí sériovou výrobu, tak i proto, že nedojde ke změně stylu jednotky, a tímto mohou být dvě vedle sebe s tím, že mezi nimi na první pohled neuvidíme rozdíl. Na obrázku lze spatřit rozdíl mezi jednotkami.



Obr. č. 27 Projektorová jednotka (dálková funkce)

Proud u jednotky pro dálkovou funkci bude o něco vyšší, a to z důvodu toho, že dálková jednotka potřebuje pro svůj světelný výstup vyšší intenzitu maxima ve svazku.

Na obrázku můžeme vidět úpravu hranice světelného svazku, kdy jsme ladili polohu hranice tak, aby splňovala homologační předpis. Dále je možno vidět, že máme příliš silné osvětlení značek, což je způsobeno tzv. třetím pásmem, které jsme museli také upravit.

6.2.1 Simulace projektorové jednotky

Simulace projektorové jednotky probíhá v software Light Tools, který nám umožní virtuální změření a poté vyhodnocení výsledné mapy na předpis. Jako zdroj používáme paprsky, které jsou zachyceny přímo na čipu diody, tyto paprsky nám dodává výrobce dané led diody a povětšinou jsou dostupné přímo na stránkách výrobce. Při vyhodnocování simulační mapy ji musíme přepočítat našim designovým tokem, který se vypočítal na základě hodnot v datasheetu. Poté získáme přibližně stejné hodnoty jako v reálném měření a můžeme takto ladit celý proces designování projektoru. Dále simulační software umožňuje tzv. barevnou simulaci, v níž můžeme vidět barevné defekty, ty mohou vznikat nedokonalou pozicí některých dílů.

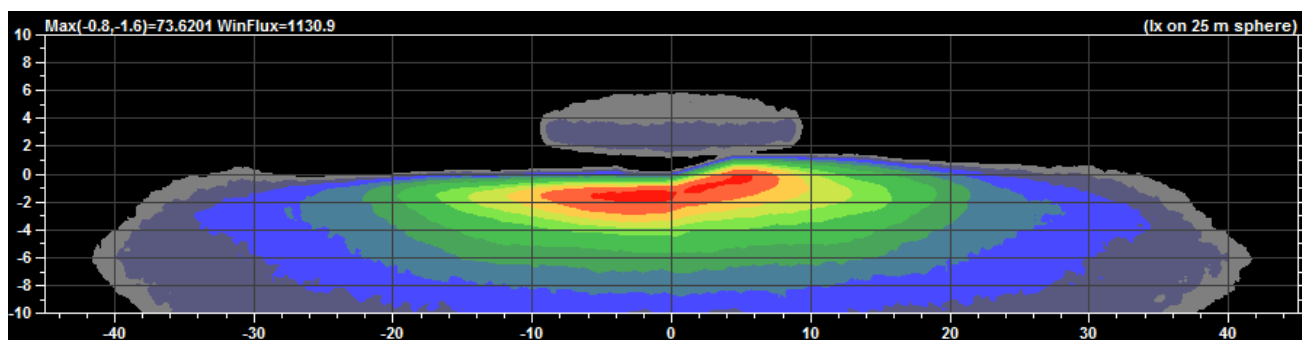
Výpočet designového toku:

Jako hlavní bin je použit bin č. B2, pro výrobní tolerance a následné sortování je schválen bin nad a pod, čili B1 a C1.

$$\Phi_{Design} = \Phi_{Norm(B2)} \times \Phi_I$$

$$\Phi_{Design} = 725 \times 0,922 = 622,4 \text{ lm}$$

Jako normalizovaný tok u binu B2 je rozpětí od 650 do 700 lm, my budeme brát střední hodnotu tohoto binu, což je cca 725 lm. Tuto hodnotu poté vynásobíme konstantou, která upravuje tok dle teploty pouzdra a proudu protékající skrz diodu. Tímto výpočtem dostaneme designový tok, který použijeme při simulacích. Jak můžeme vidět, tak designový tok, pro který bude celkový design celého projektoru přizpůsoben, je ovlivněn použitým proudem. Proud je dále limitován výkonovými parametry napájecí elektroniky a také samotnou specifikací zákazníka, který může určit maximální výkon pro kanál, pomocí něhož jsou jednotky připojeny.



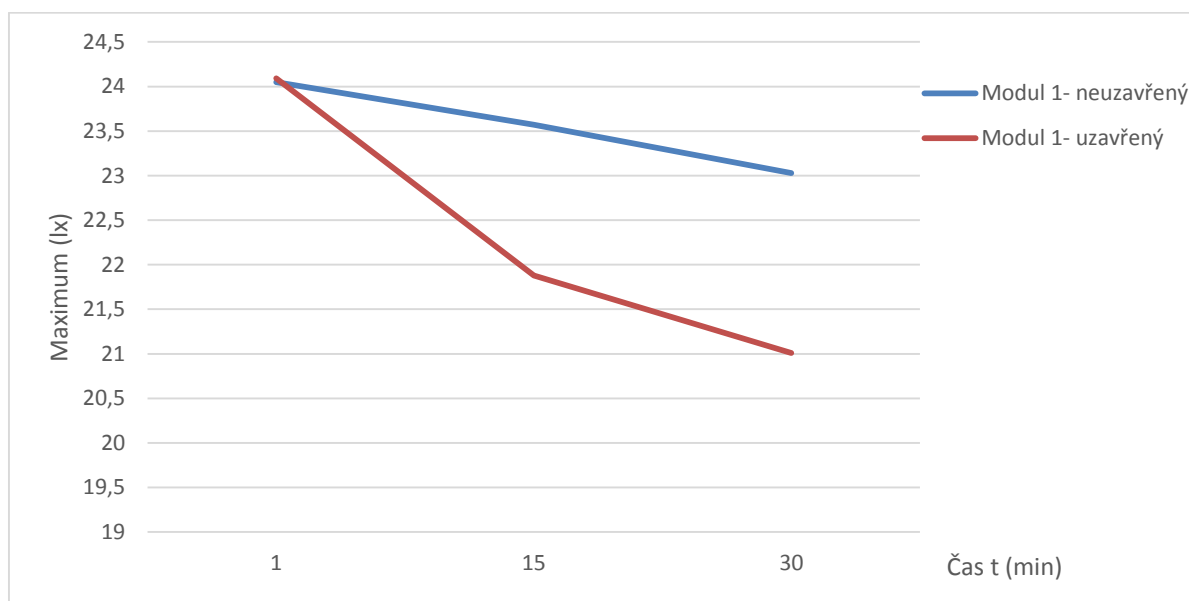
Obr. č. 28 Simulace potkávací jednotky

Simulace nám ukázala, že světelný výstup z projektorové jednotky má hodnoty velice podobné jako reálný vzorek. Rozložení světla je takřka shodné, hodnoty toku a maxima. V simulaci vyšlo, že hodnota maxima je cca 70 lx a celkový tok je 1080 lm. Tyto hodnoty jsou uměle poníženy o 12 %, což přibližně odpovídá ztrátě čelního skla. Při simulaci se načte celá geometrie do simulačního software a poté se začnou přiřazovat vlastnosti jednotlivým materiálům. Dále se načtou požadované paprsky námi

zvoleného světelného zdroje. Po úspěšné simulaci vznikne fotometrická mapa, která je zobrazena na obr. č. 28.

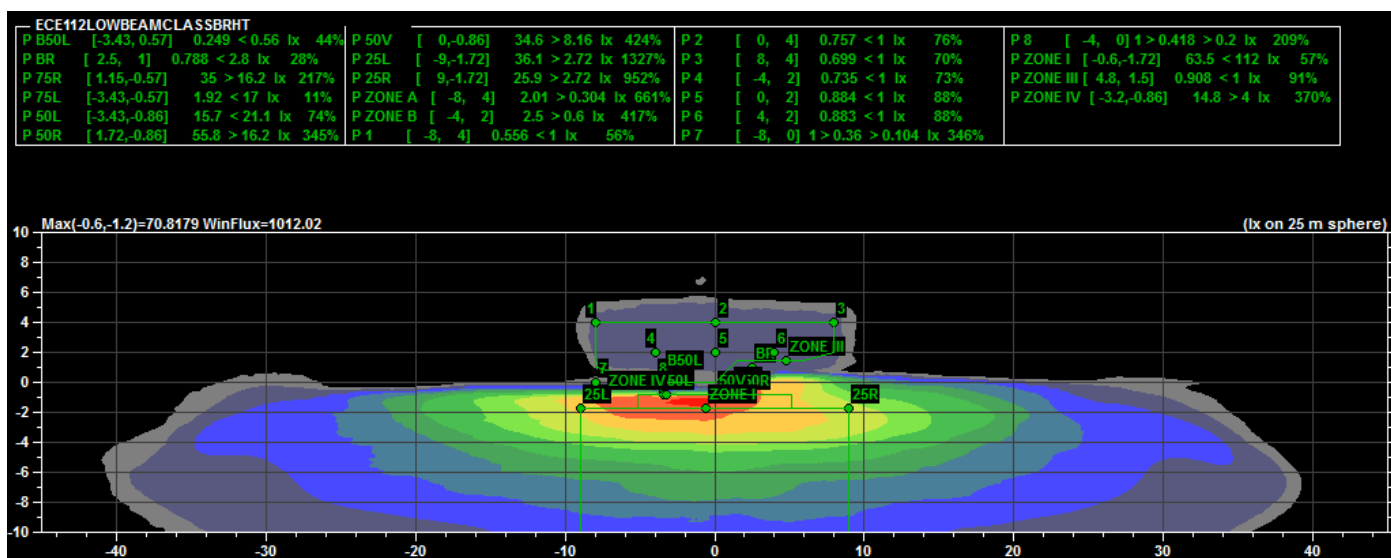
6.2.2 Měření reálného vzorku

Reálný vzorek budeme měřit na specializované zkušebně, která je určená pro měření světelných modulů a celých lamp. Měřicí zkušebna je složena z místnosti o délce 25 m, na jejím konci je umístěna fotonka, která měří celkový světelný svazek. V úrovni 10m je umístěna fotometrická stěna, na níž se dají pozorovat anomálie ve svazku, jako třeba homogenitní či barevné problémy apod. Dále jsou na stěně vyznačeny různé body a čáry, které odpovídají bodům v homologačních předpisech a podle nichž bude projektor následně homologován. Přístroj, pomocí něhož budeme celkový svazek měřit, je od firmy Instrument system a jedná se o model optogoniometru OPTRONIK SMS 10H. Tento přístroj umožňuje měření světelného toku, zaznamenání změřené fotometrické mapy, dále s ním můžeme měřit jednotlivé body, abychom hned viděli, zda jednotka splňuje předpisové hodnoty či nikoli. Poté, co umístíme projektorovou jednotku do přípravku, nastavíme proud zvolený na základě teoretických výpočtů 1,3 A. U LED diodových zdrojů, i když je náběh okamžitý, jak je uváděno, musíme počkat cca 30 min, než dojde k tepelné stabilizaci. Po uplynutí 30 minut můžeme začít s měřením vzorku. Tepelná stabilizace má obrovský vliv na celkový světelný výstup z jednotky, jelikož při zahřátí dojde k poklesu výstupního světelného toku LED diody, což má také vliv na celkový světelný tok projektoru a na jeho maximum. Proto se při designování dbá na to, aby kritické body měly dostatečnou rezervu a nemusely se poté drastickým způsobem provádět změny v designu. Pro ukázkou, jak degraduje světelný tok v závislosti na čase (s rostoucím časem roste i teplota), se můžeme podívat na graf č. 1, který ukazuje hodnotu maxima v různých časových intervalech.



Graf. č. 1 Degradace světelného toku

Po ustálení světelného výstupu led diody (cca 30 minut) můžeme přejít k samotnému měření našeho vzorku. Abychom mohli správně modul měřit, je nutné nastavit optický střed, který je umístěn na středu čočky. Poté si seřídíme hranici dle předpisu, to je možno vidět na obrázku č. 28, kde vidíme celkový výstup jednotky, který bude detailně popsán. Na fotometrické stěně si lze povšimnout, že světelný výstup přesně kopíruje vytvořenou clonu zobrazující celkový obraz hranice. Jak již bylo zmiňováno, jedná se o modul, který tvoří evropskou hranici, čili zvedající se klín, je na pravé straně, neboť by mohlo dojít k oslnění protijedoucích řidičů.

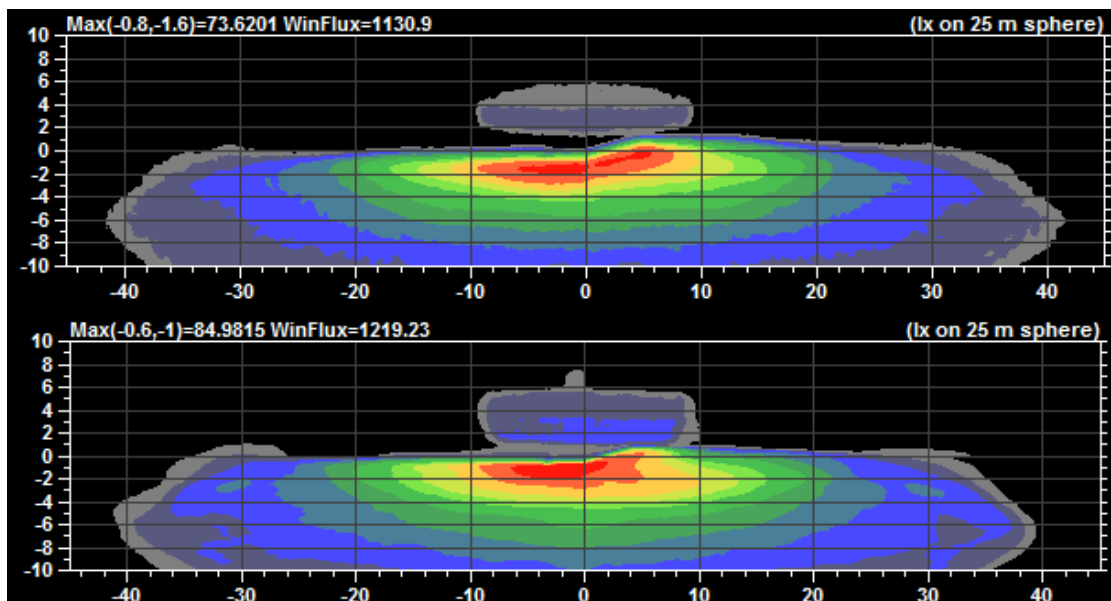


Obr. č. 29 Fotometrická mapa (reálný vzorek) vyhodnocení na předpis

Na obrázku vidíme vyhodnocení fotometrické mapy na homologační předpis ECE 112, podle kterého se tyto moduly budou homologovat. Hodnota maxima je kolem 70 lx a tok v mapě je 1012 lm. V mapě jsou započítány ztráty na skle, které činí cca 12 %. Každý světlomet má tyto ztráty jiné, a to z důvodu toho, že čelní sklo (jedná se o plastový kryt, ale z historického hlediska je zachován název sklo) může být jinak tvarován nebo má velké úkosity apod. Čelní sklo světlometu je vyrobeno z materiálu PC.

6.2.3 Porovnání simulace a reálného měření

V této kapitole bude shrnuto, jaký je rozdíl mezi simulací a reálným měřením vzorku. Je nutné si uvědomit, že v simulaci i reálném měření nacházíme určité odchylky. Je to dáno tím, že v simulaci se bere vše jako ideální a přesné. V reálném měření výsledky ovlivňuje kvalita vyrobených dílů, z nichž je projektorová jednotka složena. Odchylka je cca kolem 10 %, což je přijatelné. V reálném měření je vždy o něco více světla, to je dáno tím, že při simulaci používáme již zachycené paprsky na čipu led diody a navíc můžou někde vznikat parazitní odrazy, které také přispívají do celkového svazku a v simulaci mohou být potlačeny.



obr. č. 30 Porovnání simulace (nahore) s reálným měřením (dole)

Na obrázku č. 30 vidíme porovnání fotometrických map simulace a reálného měření, z kterého usuzujeme, že jsou si velice podobné, což je pozitivní výsledek. V ideálním případě by měly tyto mapy být „shodné“, na předešlé stránce je vysvětleno, proč tomu tak je. Závěrem této kapitoly lze jednoznačně konstatovat, že jsou simulace důvěryhodné, a i přes malou odchylku, přesné.

7 Tepelný management

V této kapitole se budeme věnovat jedné z nejdůležitějších věcí v této práci, a to chlazení LED diody. V dnešní době moderních výkonových led diod, se potýkáme s velkými tepelnými ztrátami, které negativně působí na led čip a celkově na světelnou soustavu. Jak již bylo zmíněno, teplo působí velice negativně na světelný výstup, a to tak, že při zahřívání součástky klesá světelný tok vyzařovaný led čipem. To se ve světelném svazku projevuje tak, že dochází k úbytku celkového osvětlení vozovky a také klesá hodnota v maximu, která má za následek špatný dosah celkového svazku (tzn. špatné osvětlení do dálky jak pro potkávací jednotku, tak i pro dálkovou jednotku).

7.1 Výpočet chladiče pro potkávací a dálkový modul

V této kapitole si popíšeme návrh chladiče na základě simulování chladiče, a to podle toho, jak se bude v celé soustavě chovat. Všechny hodnoty, které potřebujeme k výpočtu, vyčteme v datasheetu příslušné led diody. V našem případě to je dvou čipová led dioda od firmy Lumileds. Jelikož se jedná o tzv. mini projektory, tak i chladič musí být co nejmenší – to vede k náchylnosti na přehřívání led diody.

Výpočty pro potkávací modul:

$$T_j = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_a = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$R_{th(j-c)} = 2,5\text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

$$U_f = 6,0902\text{ V}$$

$$I_f = 1,3\text{ A}$$

Výpočet tepelného odporu chladiče pro jednu jednotku potkávací funkce:

$$P_{TOT} = U_f \times I_f = 6,0902 \times 1,3 = 8\text{ W}$$

$$T_j - T_a = P_{TOT} \times (R_{th(j-c)} + R_{th(c-h)} + R_{th(h-a)})$$

$$\frac{T_j - T_a}{P_{TOT}} - R_{th(j-c)} - R_{th(c-h)} = R_{th(h-a)}$$

$$\frac{130 - 50}{8} - 2,5 - 0,15 = R_{th(h-a)}$$

$$7,35\text{ K/W} = R_{th(h-a)}$$

Výpočet plochy chladiče pro výsledný tepelný odpor chladiče:

$$R_{th(h-a)} = \frac{3,3}{\sqrt{\lambda \times d}} \times C^{0,25} + \frac{650}{S} \times C$$

$$7,35 = \frac{3,3}{\sqrt{3,8 \times 1}} \times 1^{0,25} + \frac{650}{S} \times 1$$

$$S = \frac{650}{7,35 - \frac{3,3}{1,95}} = 115 \text{ cm}^2$$

Výpočty pro dálkový modul:

$$T_j = 150 \text{ °C}$$

$$T_a = 50 \text{ °C}$$

$$R_{th(j-c)} = 2,5 \text{ °C/W}$$

$$U_f = 6,175 \text{ V}$$

$$I_f = 1,5 \text{ A}$$

Výpočet tepelného odporu chladiče pro jednu jednotku potkávací funkce:

$$P_{TOT} = U_f \times I_f = 6,175 \times 1,5 = 9,26 \text{ W}$$

$$T_j - T_a = P_{TOT} \times (R_{th(j-c)} + R_{th(c-h)} + R_{th(h-a)})$$

$$\frac{T_j - T_a}{P_{TOT}} - R_{th(j-c)} - R_{th(c-h)} = R_{th(h-a)}$$

$$\frac{130 - 50}{9,26} - 2,5 - 0,15 = R_{th(h-a)}$$

$$5,98 \text{ K/W} = R_{th(h-a)}$$

Výpočet plochy chladiče pro výsledný tepelný odpor chladiče:

$$R_{th(h-a)} = \frac{3,3}{\sqrt{\lambda \times d}} \times C^{0,25} + \frac{650}{S} \times C$$

$$5,98 = \frac{3,3}{\sqrt{3,8 \times 1}} \times 1^{0,25} + \frac{650}{S} \times 1$$

$$S = \frac{650}{5,98 - \frac{3,3}{1,95}} = 152 \text{ cm}^2$$

Montáž	$R_{ths}[KW^{-1}]$
Přímo	0,2 až 0,4
přímo, silikonová vazelína	0,1 až 0,2
slídová podložka	0,5 až 0,8
slídová podložka, silikonová vazelína	0,4 až 0,6
teflonová podložka	1,0 až 1,6
teflonová podložka, silikonová vazelína	0,7 až 1,1

Tab. č. 2 Způsob montáže prvků na chladič

Materiál	Tepelná vodivost
Měď Cu	3,8
Hliník Al	2,1

Tab. č. 3 Tepelná vodivost materiálu chladiče

Provedení	Korekční faktor
vodorovné, hladké	1
vodorovné, černěné	0,5
svislé, hladké	0,85
svislé, černěné	0,43

Tab. č. 4 Provedení chladiče a barva

S ... plocha chladiče

d ... tloušťka desky

λ ... tepelná vodivost chladicí desky

T_j ... teplota přechodu

T_a ... teplota okolního prostředí

P_{TOT} ... celkový ztrátový výkon

U_f ... dopředné napětí

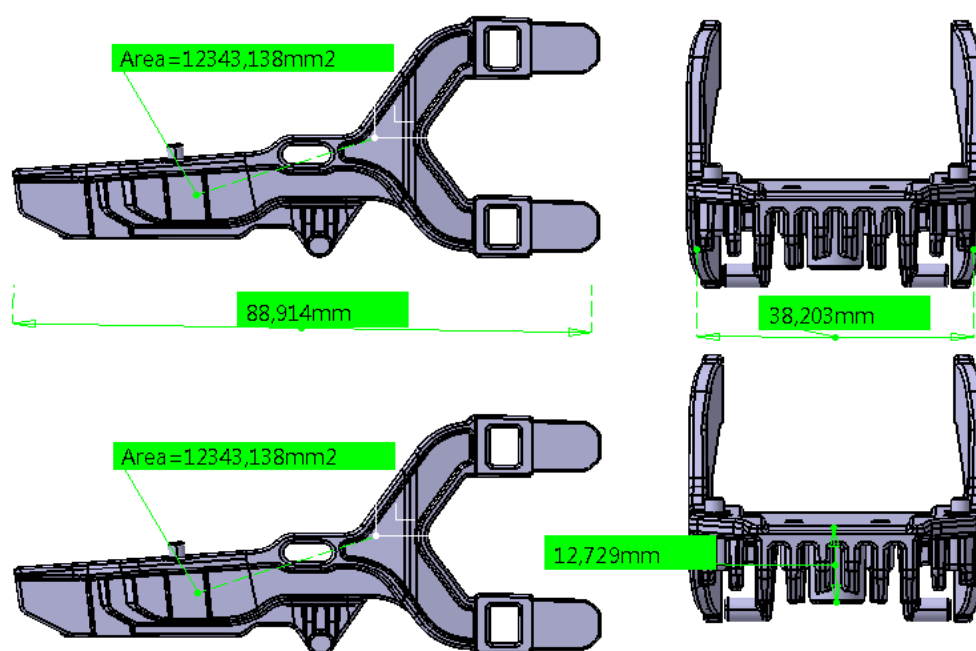
I_f ... dopředný proud

$R_{th(j-c)}$... tepelný odpor mezi přechodem a pouzdrem

$R_{th(c-h)}$... tepelný odpor mezi pouzdrem a chladičem

$R_{th(h-a)}$... tepelný odpor mezi chladičem a okolím (tepelný odpor chladiče)

Dle teoretických výpočtů lze konstatovat, že plocha chladiče pro potkávací jednotku měří cca 115 cm². Pokud se podíváme na obrázek č. 31, vidíme, že plocha reálného chladiče je o něco větší, a to 123 cm², což je způsobeno přidáním žebér a nosných pacek pro držák čočky. Dále jsou na chladiči přidány komponenty, sloužící k připevnění a vystředění reflektoru, aby byla dodržena pozice vůči led diodě, neboť je důležité, aby nedocházelo k tomuto jevu a nebyl změněn optický výstup z projektoru. Maximum celého svazku vlivem posunu reflektoru se následně může přesouvat vlevo, vpravo nebo se oslabuje a zesiluje. Aby nedocházelo k posunům ve všech osách, je pozice led diody zajištěna dvěma šrouby a také je zajištěn kontakt s chladičem. V teoretické části jsme si popisovali tepelný styk pouzdra diody s chladičem, ten je zajištěn teplo vodivou pastou, aby došlo k co možná nejlepšímu tepelnému odvodu od pouzdra diody. U jednotky pro dálkovou funkci je situace obdobná. V teoretickém výpočtu vyšla plocha chladiče cca 152 cm², u reálného chladiče je plocha chladiče o něco větší, a to 195 cm². Tato odchylka je způsobena přidáním komponentů, jak již bylo zmiňováno u popisu chladiče potkávací jednotky.



Obr. č. 31 Chladič projektorové jednotky (potkávací funkce)

V další části bude ukázáno zadání termální simulace a ověření teoretických výsledků návrhu chladiče pro obě jednotky. Teplota uvnitř celé lampy je cca 50 °C, je to dáno z toho důvodu, že v lampě jsou umístěny okolní světelné funkce, které přispívají teplotě uvnitř lampy. Dále je celý držák i s moduly zakryt okrasným dílcem, který také zamezuje proudění vzduchu. Již z předpokladu sériových lamp je zřejmé, že bude muset být použito aktivní (nucené chlazení). Při výpočtu tepelného odporu chladiče musí být hodnota použitého chladiče menší - s použitím aktivního chlazení se hodnota ještě zmenšuje. Při tepelné simulaci musíme sečíst všechny výkony jednotlivých modulů, jelikož vycházíme z požadavků na fotometrii pro zákazníka, proto budeme mít tři moduly pro potkávací funkci a dva moduly pro dálkovou funkci. Tím máme celkovou výkonovou ztrátu přeměněnou na teplo kolem 20,4 W pro potkávací funkci a 15,74 W pro dálkovou.

7.2 Teplená simulace

Výpočet pro tepelnou simulaci:

$$P_{CP} = P_{P1} + P_{P2} + P_{P3} \times 0,85$$

$$P_{CD} = P_{D1} + P_{D2} \times 0,85$$

P_{CP} ... celkový ztrátový výkon pro potkávací funkci

P_{PX} ... ztrátový výkon jednotlivých potkávacích modulů

P_{CP} ... celkový ztrátový výkon pro dálkovou funkci

P_{PX} ... ztrátový výkon jednotlivých dálkových modulů

Ambient temperature		50 °C			
Function	Bulb	Nominal power at 14 V (W)	Turn on/off (s)	Power load	
				%	(W)
HB	2 x Altilon	15,74	ON	85	13,4
LB	3 x Altilon	23,8	ON	85	20,23

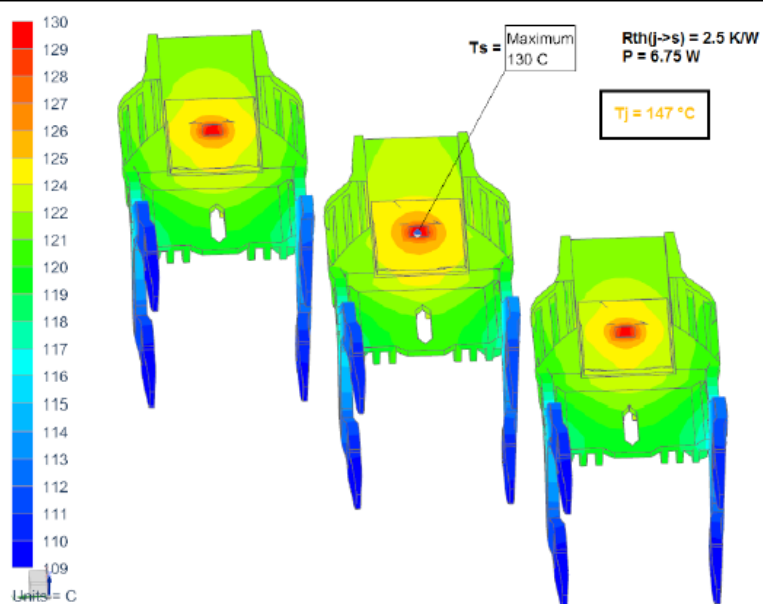
Tab. č. 5 Tabulka se zadáním pro tepelnou analýzu

V tabulce č. 5 vidíme hodnoty, které budou použity pro teplotní simulaci. Celkový ztrátový výkon, jenž zohledňujeme v simulaci, je ponížen o 15 %, a to z důvodu toho, že 15 % ztrátového výkonu led dioda vydrží. Vše, to co je nad tuto hodnotou, je nutné chladit.

Part/Function	T _{MAX} (°C)	Material	T _{HDT} (°C)	T _{VICAT} (°C)	T _{Allowed} (°C)
Housing	75	PP-TD40 Innopol CS1-4140 BAP	120	152	113
Lens	68	PC Lexan 141R	136	141	129
All plastic parts	123	PC	136	141	129
LEDs LB	147	Semiconductor			143
LEDs HB	138	Semiconductor			143

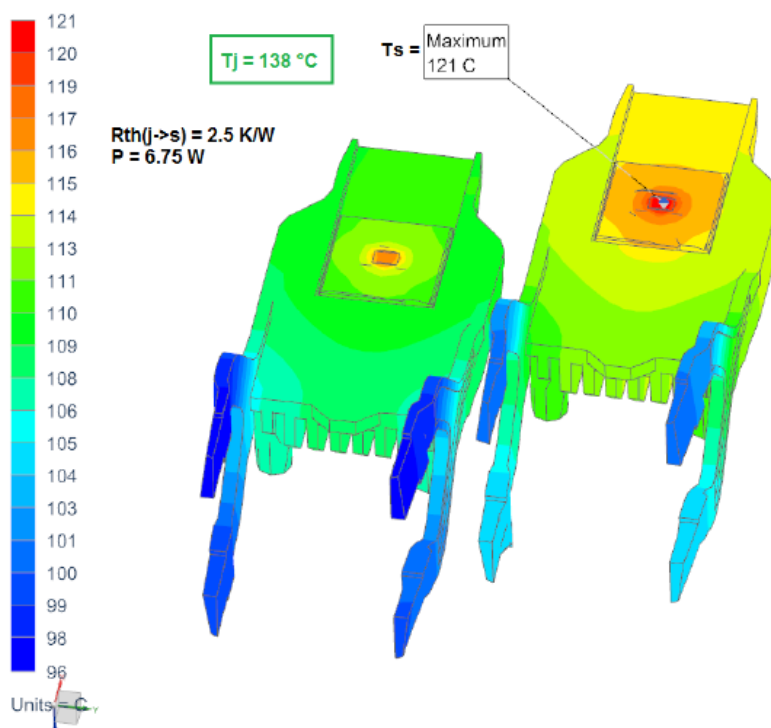
Tab. č. 6 Tabulka s výslednými teplotami a použité materiály

Test 1						
Part/Function	Page	T_{MAX} [°C]	Material	Data sheet $T_{Junction}$ [°C]	$T_{Allowed}$ [°C]	Heat safety
LEDs LB	5	147	Semiconductor	150	143	RISK



Obr. č. 32 Tepelná analýza projektorové jednotky (potkavací funkce)

Test 1						
Part/Function	Page	T_{MAX} [°C]	Material	Data sheet $T_{Junction}$ [°C]	$T_{Allowed}$ [°C]	Heat safety
LEDs HB	5	138	Semiconductor	150	143	PASS



Obr. č. 33 Tepelná analýza projektorové jednotky (potkavací funkce)

Na obrázcích č. 32 a 33 vidíme výsledek teplotní analýzy modulů, které tvoří full LED hlavní funkce. Z analýzy lze vidět, že u potkávacích modulů je povolená teplota lehce překročena, ovšem je to v řádu °C, což je v normě – výsledek můžeme považovat za akceptovatelný. Dle datasheetu od výrobce je maximální povolená teplota přechodu T_j 150°C, přičemž tuto teplotu je možné v reálných provozních podmínkách dodržet. Dále se podíváme na jednotky pro dálkovou funkci, které jsou na tom teplotně o něco lépe, i když používáme maximální proud. Je to způsobeno tím, že moduly jsou pouze dva a jsou hned na začátku lampy, kde není soustředěno tak velké teplo.

8 Porovnání projektorových jednotek s LED, HID a halogen světelným zdrojem

V této kapitole budou porovnány projektorové jednotky, které plní funkci potkávací a dálkovou s různými světelnými zdroji. Z porovnání se dozvíme, jaké jsou přednosti, nebo nedostatky, v použití moderních více čipových LED diod, v porovnání s již osvědčenými konvenčními světelnými zdroji, jako je výbojka, nebo halogenová žárovka. V krátkosti se také podíváme na základní charakteristiky světelných zdrojů, protože bez toho bychom si nedovedli představit, jak velké jsou rozdíly v použití různých zdrojů.

8.1 Světelné zdroje

Světelné zdroje se od sebe liší jak výrobní technologií, tak i materiálem použitým na vyzařování fotonů. Proto si tyto odlišnosti v této kapitole popíšeme. Světelné zdroje se od sebe liší také svým maximálním tokem, který mohou poskytnout.

8.1.1 Halogenová žárovka

Nejstarší světelný zdroj, který se v automotive používá, je halogenová žárovka. Tento typ světelného zdroje je v porovnání s výbojkou a led diodou nejstarší, avšak pořád ve velké míře používán. Halogenovou žárovku můžeme řadit do kategorie tzv. tepelných světelných zdrojů. Objev tohoto světelného zdroje se datuje kolem roku 1959. Výkon halogenových žárovek pro hlavní světlomet se pohybuje od 55W do 60W. Konstrukčně má halogenová žárovka baňku vyrobenou z křemenného nebo tvrdého skla, které má vyšší mechanickou pevnost a teplotní odolnost, to umožňuje zvýšení tlaku v baňce a tím i větší teplotu, včetně snížení odpařování vlákna. Minimální pracovní teplota se pohybuje kolem 250°C. Wolframové vlákno je umístěno v ose válcové baňky. Aby se zajistily příznivé vlastnosti žárovky, je baňka plněna směsicí inertních plynů s příměsí halových prvků. Úhlově vyzařuje žárovka do prostoru 360°, proto je vhodná pro použití v bi-projekční jednotce.

Výhody halogenové žárovky:

- nažloutlé světlo, teplota chromatičnosti kolem 3000 K
- okamžitý start světelného zdroje
- malý úbytek svítivosti na konci životnosti (kolem 5 %)
- nízká cena (nepotřebuje dodatečnou elektroniku)

Nevýhody halogenové žárovky:

- menší světelný výkon
- svítivost je závislá na velikosti napětí
- časté zapínání zkracuje dobu životnosti

8.1.2 Xenonová výbojka

Tento zdroj byl donedávna považován za vrchol v automobilovém osvětlení, ovšem s nástupem led diodové technologie se začíná ztrácet a nahrazuje se již zmiňovanými led zdroji. Xenonová výbojka má nesporně mnoho výhod jak v konstrukci, tak i ve svém světelném výkonu. Světlomety musí být vybaveny elektronickou regulací sklonu světloometu a vlastní řídicí jednotkou, která obstarává napájení výbojek, a to z důvodu vysoko napěťového výboje mezi elektrodami. Jako plnicí plyn v baňce výbojky se používá xenon. Oblouk vzniká napěťovým impulsem o hodnotě 24 kV. To umožní ionizaci a vznikne hoření mezi elektrodami, poté elektronická jednotka sníží napětí na 85 V a příkon výbojky na 35 W. Dnes jsou již dostupné i 25 W výbojky.

Výhody xenonových výbojek:

- lepší podání barev (blíží se k dennímu světlu)
- vyšší životnost proti obyčejné žárovce
- lepší osvětlení vozovky, tím i vnímání řidiče

Nevýhody xenonových výbojek:

- vyšší cena oproti žárovce a led diodě
- složitější napájení přes řídicí jednotku pouze proti halogenové žárovce
- nemožnost záměny s halogenovou žárovkou

8.1.3 Led dioda

Podrobný rozbor principu funkce led diody je v teoretické části, kde bude pouze ve zkratce popsán princip, výhody a nevýhody této technologie v porovnání se dvěma předešlými světelnými zdroji. Hlavní výhody použití LED diody jsou především malá konstrukce proti klasickému zdroji, kdy tímto je možno konstruovat menší a kompaktnější jednotky, kladoucí velké požadavky na design. Další výhodou, díky které se led diody čím dál častěji využívají, je jejich teplota barvy (kolem 5 300 K – je tedy nejbělejší). LED diody lze také používat pro tzv. matrix systémy, při jejich využití můžeme jet s vozem se zapnutými dálkovými světly, aniž bychom oslnili protijedoucí vozidla, neboť se vypínají segmenty, v nichž svítí daná LED dioda.

Výhody LED diod:

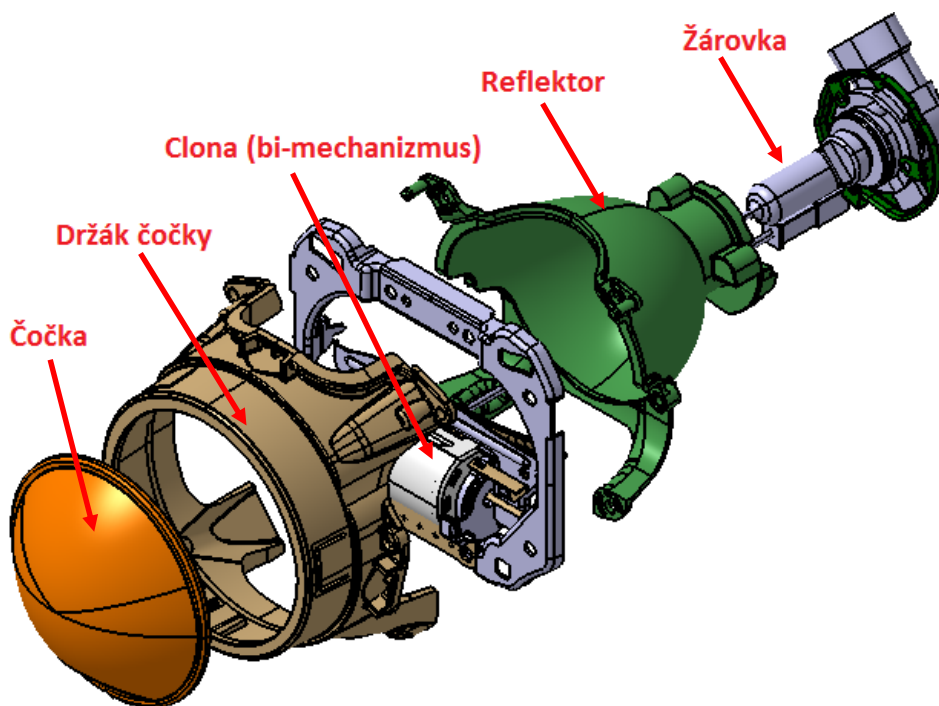
- rozměry
- vysoká životnost až 50 000 h
- odolné proti nárazům
- rychlý náběh

Nevýhody LED diod:

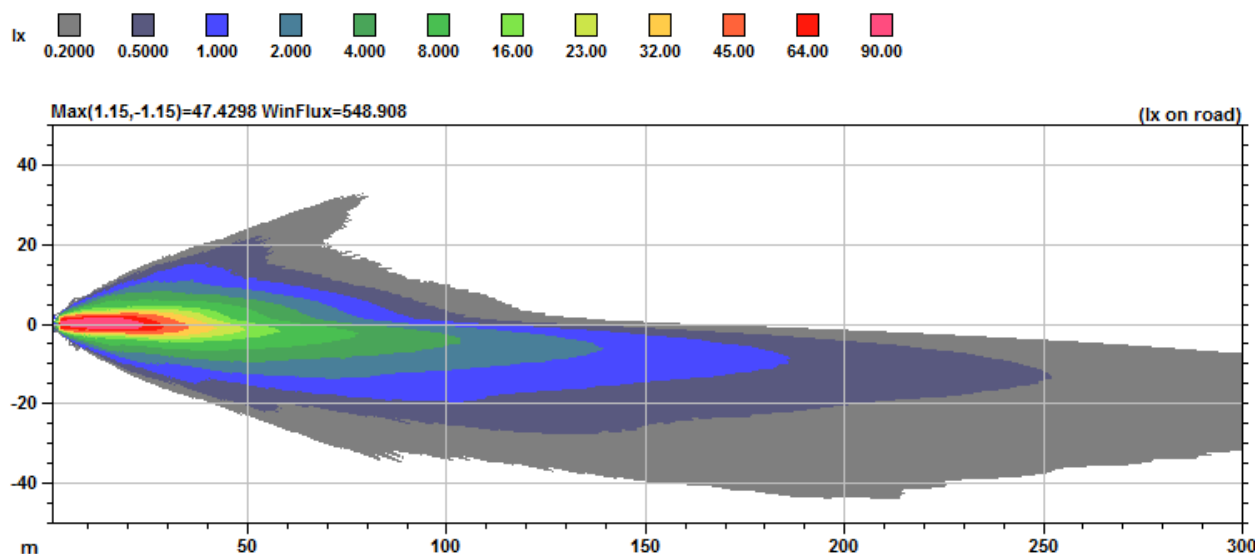
- u výkonových led diod velká tepelná ztráta
- životnost závislá na teplotě a okolních podmínkách
- vyšší cena (platí pouze pro halogenovou žárovku)
- nelze vyměnit (pouze světelný zdroj)

8.2 Halogenový projektor

Nyní si popíšeme funkci halogenového projektoru a také světelný výstup z této jednotky. Princip funkce je stejný, jako již popisovaný led projektor v minulých kapitolách, ovšem u halogenového projektoru je odrazná plocha, čili eliptický reflektor jiný, a to z důvodu toho, že halogenová žárovka vyzařuje prostorově 360°. Celá jednotka je tak větší, ovšem lze využít toto světlo za účelem posílení maxima celkového svazku. Další výhodou je využívání i spodní části reflektoru, protože celkový svazek tvoří tzv. barevnou hranici (modrá barva). Dále jednotka může být tzv. bifunkční, přičemž platí, že projektor lze využít pro tlumený a dálkový svazek. Halogenový projektor je ve své kategorii nejslabší jednotkou, jelikož halogenová žárovka sama o sobě podává menší světelný tok, v porovnání s xenonovou výbojkou, nebo led diodou. Velkou výhodou je, že halogenovou žárovku lze snadno vyměnit a její cena se pohybuje v rozmezí stovek korun, avšak svým výkonem a barvou světla je zařazena do kategorie levných modulů, a proto se jednotky montují do základních řad modelů automobilů.

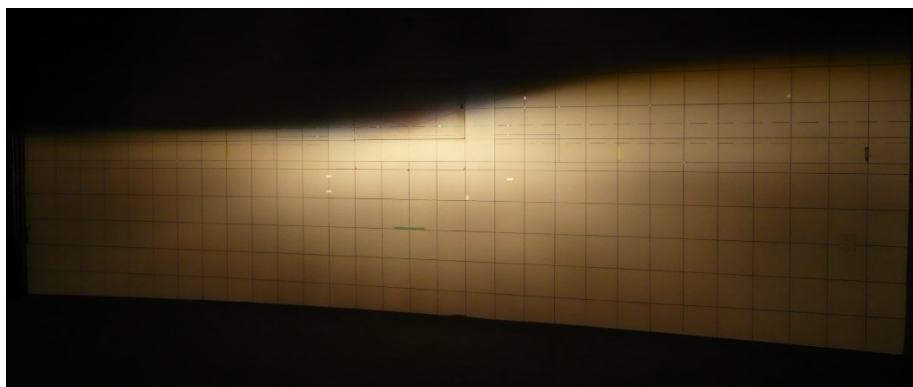


Obr. č. 34 Rozpad halogenového projektoru



Obr. č. 35 Potkávací funkce (rozložení světla na cestě)

Na obrázku vidíme rozložení světla na vozovce, kde jednotlivá barevná rozhraní udávají intenzitu v lx, obě dvě osy jsou v metrech a vyjadřují dosah světelného svazku z projektoru. Za výrazně viditelnou bereme 1 lx intenzitu, která má sytě modrou barvu. Nad fotometrickou mapou je legenda pro jednotlivé barvy vyjadřující intenzity. Tato intenzita sahá až do 185 m, a proto můžeme prohlásit, že se jedná o dosah potkávací funkce. V mapě jsou sečteny projektory pro dvě lampy, ovšem hodnoty maxima a toku jsou uváděny pro jednu lampu.

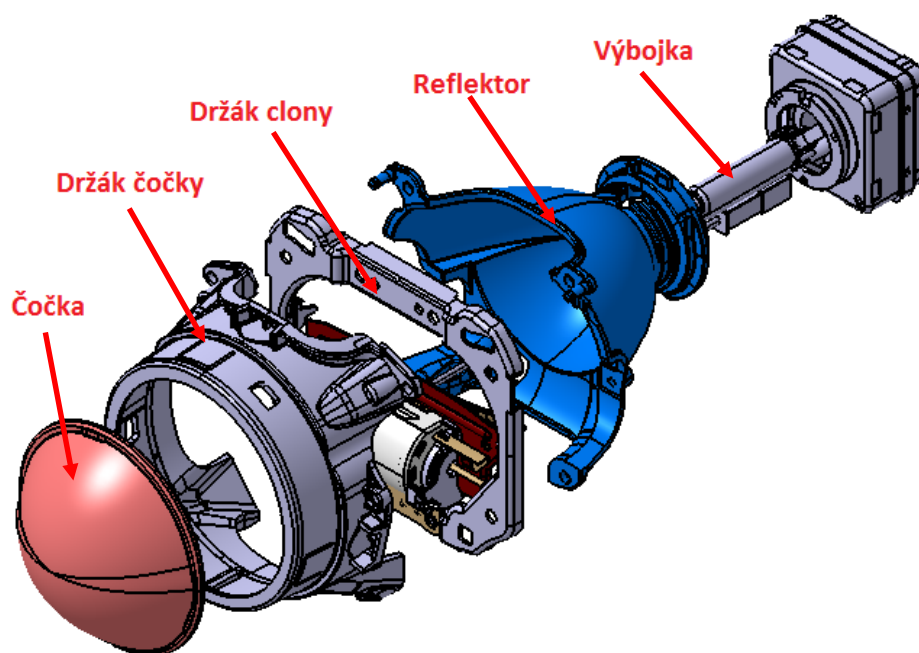


Obr. č. 36 Potkávací funkce halogenového projektoru (rozsvícený reálný kus na fotometrické stěně)

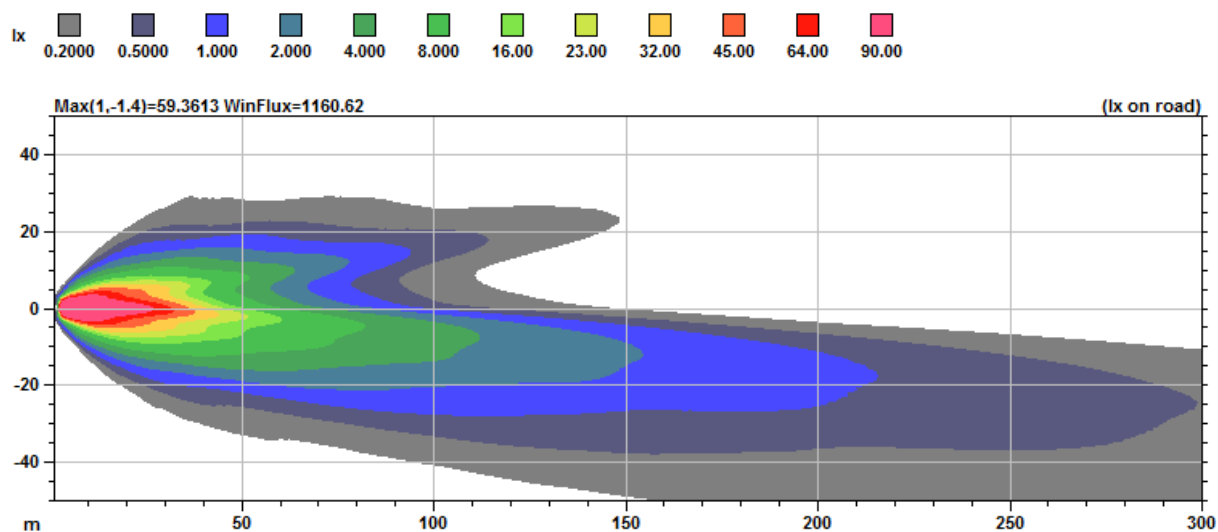
Obrázek č. 36 nám ukazuje rozsvícený reálný kus na fotometrické stěně. Z obrázku je patrné, že je projektorová jednotka s halogenovým světelným zdrojem značně nažloutlá. To potvrzuje předešlá tvrzení, že výbojka a led dioda jsou bělejší, vyplývá to i z teploty barvy zdroje, která je u halogenové žárovky cca 3600 K.

8.3 Projektor s xenonovou výbojkou

Tento typ projektoru, jak je patrné z názvu kapitoly, obsahuje xenonovou výbojku jako světelný zdroj. Výbojka podává 3200 lm světelný tok, což je poměrně dost světla, a proto se výbojkovým projektorem vybavují automobily s vyšší výbavou, ovšem dnes tuto technologii nahrazují led diodové zdroje. Konstrukce tohoto projektoru je stejná jako u halogenového projektoru, opět je využíván celý reflektor i jeho spodní část, neboť také výbojka vyzařuje světlo v 360°. Teplota barvy výbojkového zdroje je cca kolem 4300 K, což se blíží dennímu světlu, a je bělejší než halogenový zdroj. Kombinace většího světelného toku a bělejšího světla nám výsledně dá to, že výbojkový projektor poskytne lepší osvětlení a tím i komfortnější jízdu v noci. S lepším osvětlením je i provoz bezpečnější. I přes tyto pozitivní vlastnosti má výbojkový projektor nepatrné vady. Mezi ně řadíme složitější napájení výbojky přes jednotku (nutná pro vysokonapěťový impuls), dále je nutné, aby byl automobil vybaven automatickým sklonem světlometů a také aby měl ostříkovač světlometů.

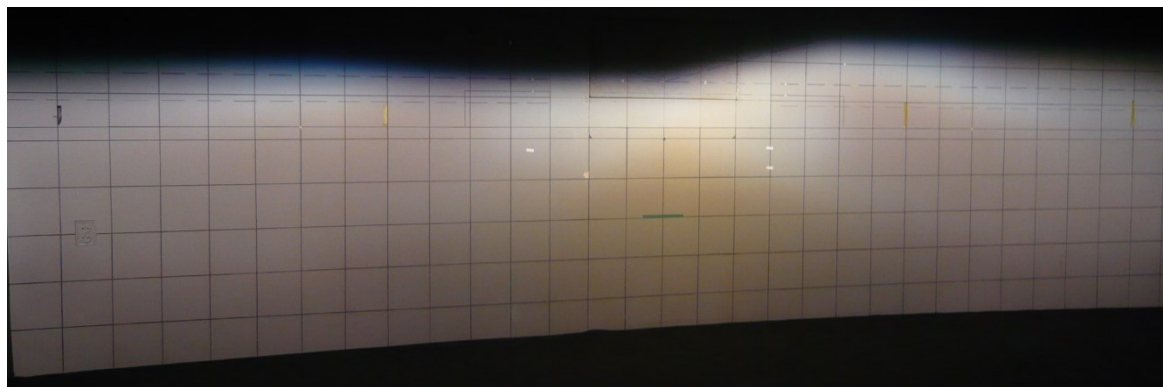


Obr. č. 37 Rozpad výbojkového projektoru



Obr. č. 38 Potkávací funkce (rozložení světla na cestě)

Na obrázku vidíme rozložení světla na vozovce, kde jednotlivá barevná rozhraní udávají intenzitu v lx, obě dvě osy jsou v metrech a vyjadřují dosah světelného svazku z projektoru. Za výrazně viditelnou považujeme 1 lx intenzitu, která má sytě modrou barvu. Nad fotometrickou mapou je legenda pro jednotlivé barvy vyjadřující intenzity. Tato intenzita sahá až do 215 m, a proto můžeme konstatovat, že se jedná o dosah potkávací funkce. V mapě jsou sečteny dva projektory, ovšem hodnoty maxima a toku jsou uváděny pro jednu jednotku.

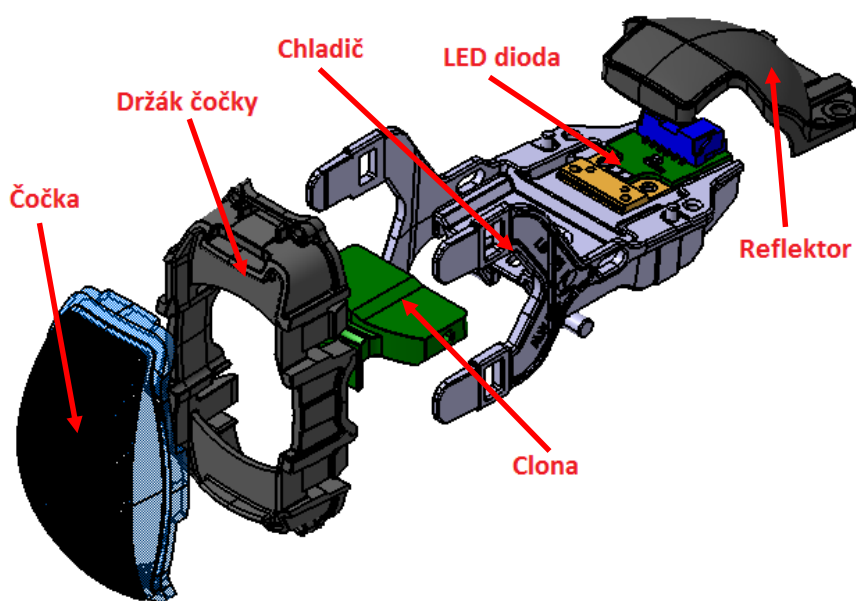


Obr. č. 39 Potkávací funkce výbojky (rozsvícený reálný kus na fotometrické stěně)

U obrázku č. 39 vidíme rozsvícený reálný kus na fotometrické stěně. Z obrázku je patrné, že je projektorová jednotka s výbojkovým světelným zdrojem podstatně bělejší než halogenová jednotka. To potvrzuje předešlá tvrzení, že výbojka a led dioda jsou bělejší v porovnání s halogenovým zdrojem.

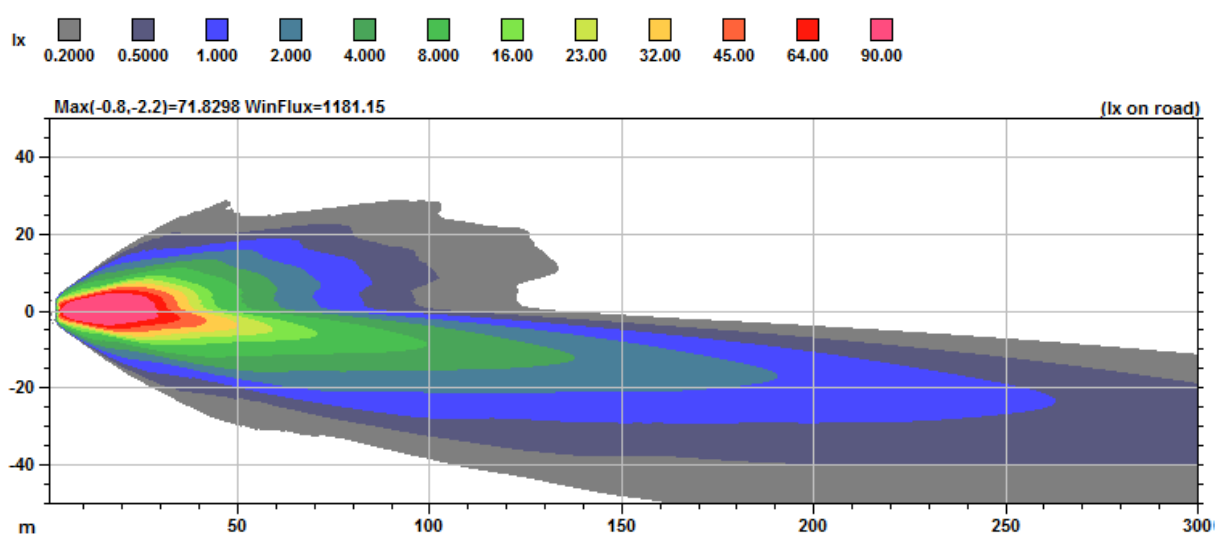
8.4 Projektor s LED diodou

Veškeré předešlé kapitoly byly věnovány tomuto tématu, proto již nebudeme detailně vysvětlovat žádné principy funkce, pouze budou předvedeny optické výsledky, jako u předchozích dvou kapitol 9.3 a 9.2 pro jejich srovnání. Celkové zhodnocení výhod a nevýhod bude objasněno v následující závěrečné kapitole.



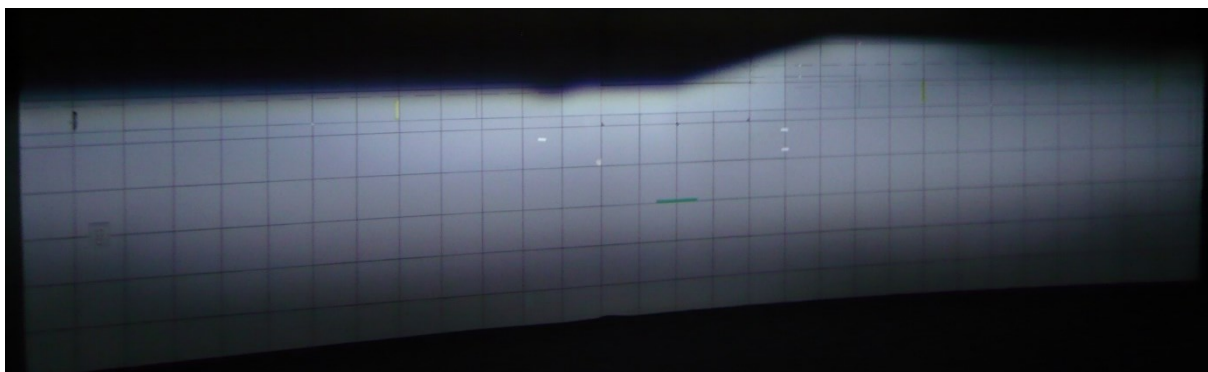
Obr. č. 40 Rozpad LED projektoru

Jen pro představu, na obrázku 40 můžeme vidět rozpad LED projektoru. Jak již bylo zmiňováno, tento projektor využívá pouze vrchní část reflektoru, a to z důvodu toho, že led dioda svítí pouze ve 180° rozložení.



Obr. č. 41 Rozložení světla na cestě

Na obrázku č. 41 je vidět rozložení světla na vozovce. Pro zhodnocení dosahu tlumeného svazku bereme v potaz 1 lx hodnotu (sytě modrá), která má u LED projektoru hodnotu cca 260 m. I zde je celkový tok a maximum vztaženo na jednu celkovou potkávací funkci (u mini projektoru se jedná o 3 moduly).



Obr. č. 42 Potkávací funkce LED (rozsvícený reálný kus na fotometrické stěně)

Pokud se podíváme na obrázek 42, vidíme rozsvícený reálný kus. Je patrné, že světelný výstup led projektoru má velmi bílé podání barev, což potvrzuje předešlá tvrzení. Projektorové jednotky s těmito světelnými zdroji jsou tak bílé, že nabývají modrého spektra. Samotná led dioda má teplotu 5300 K, což je nejvíce ze všech světelných zdrojů pro hlavní světlomet. V následující kapitole bude zhodnocení kladných a záporných vlastností každého projektoru.

8.5 Závěrečné porovnání

V této kapitole se budeme věnovat celkovému porovnání projektorových jednotek s různými typy světlených zdrojů. Odlišné zdroje mají vliv na celkový optický výkon, ať je to hodnota maxima či celkový tok.

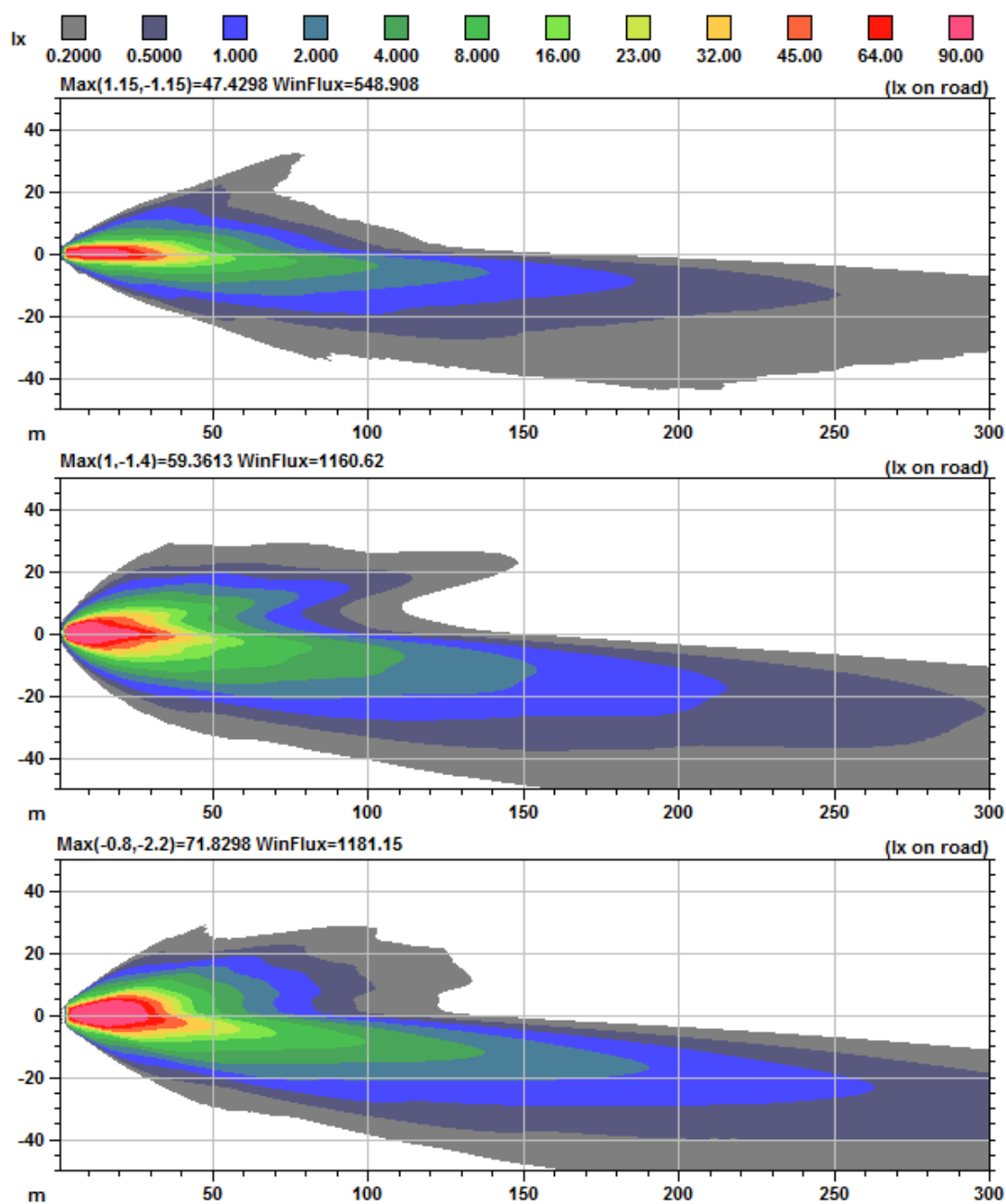
	Projektor s halogenovým zdrojem	Projektor s výbojkovým zdrojem	Projektor s led zdrojem
Maximum	47 lx	60 lx	71 lx
Tok	550 lm	1160 lm	1180 lm
Teplota světla	3600 K	4300 K	5300 K
Životnost	550 h	3500 h	10000 h
Vyměnitelnost zdroje	ANO	ANO	NE
Cena při výměně světleného zdroje	od 100 Kč	od 2000 Kč	od 20 000

Tab. č. 7 Tabulka pro porovnání projektoru s různými světelnými zdroji

Projektor s halogenovým zdrojem, jak můžeme vidět, má menší maximum a světelný tok, který je cca poloviční, proto tuto jednotku řadíme do levných projektorových jednotek, kterými jsou vybaveny levnější automobily. Další nevýhodou je malá výdrž halogenové žárovky – ta je způsobena konstrukcí, kdy se žhavením vlákna zmenšuje jeho odolnost. Pokud bychom měli srovnat barvu vystupujícího světelného svazku, dojdeme k závěru, že halogenový projektor je poměrně dost žlutý, to je způsobeno teplotou barvy světelného zdroje, která je 3600 K. Ovšem tyto nevýhody vyvažuje cena halogenové žárovky, která začíná na 100 Kč, a je tedy z hlediska údržby nejlevnější. Další pozitivní vlastností je také to, že je velmi jednoduchá, a navíc, projektor nepotřebuje žádné dodatečné jednotky k napájení a ani žádné jiné funkce světlometů – jako např. – ostříkovače, automatické naklápění.

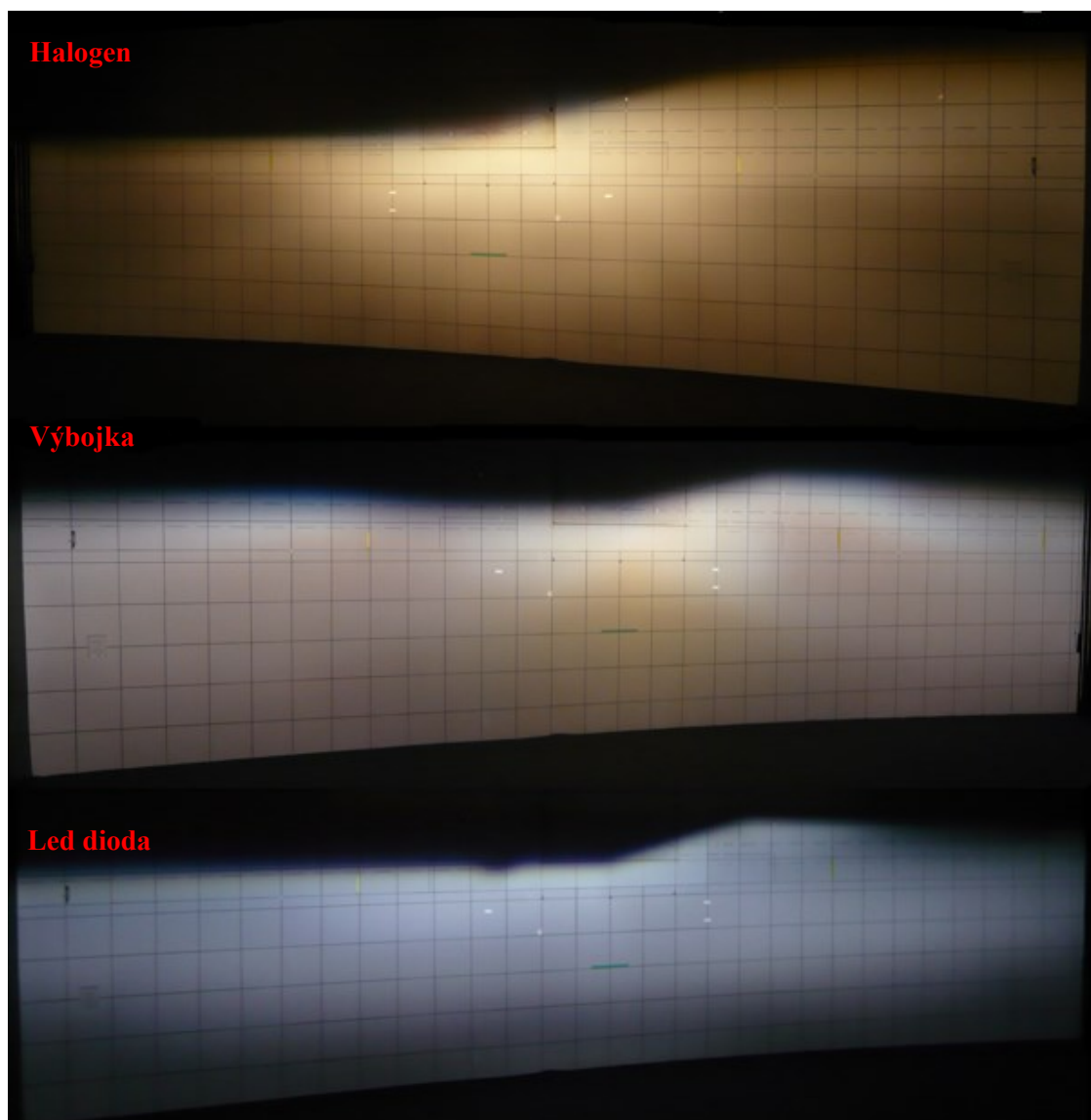
Projektor s xenonovou výbojkou má dvojnásobný tok a i maximum je větší o cca 13 lx, to je způsobeno tím, že výbojkový zdroj poskytuje 3200 lm tok, což je v porovnání s halogenovou žárovkou téměř dvojnásobek. To nám umožňuje, abychom dostatečně osvětlili prostor před vozidlem. Pokud bychom se podívali na teplotu barvy, dojdeme k závěru, že výbojka bude mít barvu, která bude bělejší bez většího nádechu žluté barvy. Výdrž výbojkového zdroje je cca 7 krát delší než u žárovky, a i když je výbojka dražším zdrojem, svou cenu tímto vyvažuje. Mezi negativní vlastnosti musíme řadit i to, že životnost výbojky je omezena častějším zapnutím a vypnutím, dále musí být ve vozidle nainstalována složitější elektronika, která obstarává napájení výbojky a automatická regulace sklonu světlometů (další snímače ve voze).

Projektor s led diodovým zdrojem lze považovat za nejmodernější jednotky tvořící hlavní funkce v automobilu. Pokud se podíváme na tabulku hodnot, zjistíme, že jsou dost podobné s xenonovým projektorem, ovšem projektory s led technologií umožňují vytvářet různé designové tvary celých modulů, a proto jsou dnes tak rozšířené. Z tabulky usuzujeme, že tok je téměř shodný s výbojkovým zdrojem. Pro kombinaci LED diod v této práci (3 dvojčipové diody), které mají tok cca 2040 lm, což je větší, než u halogenového zdroje, ale menší než u výbojkového. Maximum je o něco vyšší než u výbojky. Stejně nevýhody jako výbojka, mají i led diody, neboť potřebují elektroniku, která je bude napájet. Dále je zapotřebí automatický sklon a ostříkovač. Jedním z vážnějších problémů je bohužel vyměnitelnost led diod v případě, že přestanou svítit. Vzhledem k tomu, že se jedná o celkovou sestavu, nelze diodu vyměnit, a proto je zapotřebí vyměnit celý světlomet, který je dosti finančně náročný.



Obr. č. 43 Porovnání rozložení světla jednotlivých projektorů na cestě

Na obrázku č. 43 vidíme porovnání světelných kuželů jednotlivých projektorů. Z obrázků vyplývá, že projektor s halogenovým zdrojem má nejmenší dosah a s tím také souvisí jeho maximum a tok. Na základě těchto informací vychází nejlépe led projektor, ovšem výbojkový projektor je svým výkonem velice podobný. Největší dosah má led diodový projektor, jeho rozložení světelného svazku je podobné výbojkovému projektoru, tokově jsou shodné, maximum je o něco menší, proto je u led projektoru větší dosah. V následujícím odstavci se podíváme na barvu jednotlivých svazků.



Obr. č. 44 Porovnání barvy světla na fotometrické zdi

Zde můžeme vidět porovnání barevnosti jednotlivých projektorů. Naše tvrzení z předešlých kapitol se potvrdilo – led diodový projektor vykazuje největší známky bílé, osobně bych řekl až do modra. Myslím si, že ideální variantou se jeví výbojkový projektor, jelikož má barvu podobnou dennímu světlu.

9 Reálný vzorek

Tato kapitola má pouze informativní charakter, a to ve smyslu ukázky reálného vyrobeného kusu. Jedná se o jeden mini projektor pro potkávací funkci.



Obr. č. 45 Reálný funkční vzorek (jednotka)

Zde je názorná ukázka, jak vypadá reálný vyrobený mini projektor. Pro představu jeho velikosti, je jako měřítko použita propiska. Na základě obrázku lze usoudit, že se jedná o velmi malou kompaktní jednotku, díky níž je možno zkonstruovat poměrně malý světloomet. Na dalším obrázku vidíme jednotlivé díly mini projektoru.



Obr. č. 46 Reálný funkční vzorek (jednotlivé díly)

Závěr

V této diplomové práci bylo cílem, vytvoření funkční jednotky pro hlavní světlomet, ve smyslu potkávací a dálkové funkce a také porovnání s ostatními používanými světelnými zdroji. Diplomová práce je složená ze dvou částí, a to teoretické a praktické. V teoretické části se věnuji teorii, která je nezbytná pro pochopení funkce led diod a také možným problémům, jenž mohou nastat při použití této technologie.

Praktická část se týkala návrhu kompletní jednotky pro potkávací a dálkovou funkci. V práci se však detailněji věnujeme pouze jednotce pro potkávací funkci, jelikož je konstrukčně složitější. Základem tedy bylo, vytvořit co nejmenší jednotku. Tento úkol byl však obtížný v tom, neboť konstrukce malé jednotky, se neprojevila jako vhodná z hlediska požadavků, proto jsme zvolili jako finální řešení použití trojici mini modulů pro potkávací funkci a dvojici mini modulů pro dálkovou funkci na jeden světlomet. Abychom dodrželi požadavek malých rozměrů, byla jako světelný zdroj použita dvou čipová led dioda od firmy Lumileds typ Altilon. Výsledkem bylo, že jednotka bude mít celkový výstupní tok 1180 lm a maximum okolo 70 lx. Pro splnění těchto hodnot bylo důležité vybrat správné hodnoty napájecího proudu pro led diodu. Na proudu je důležité, jaký světelný tok bude led dioda poskytovat. Z tohoto důvodu byl tedy proud stanoven na 1,3 A pro potkávací modul a 1,5 A pro dálkový modul. U dálkového modulu je to hodnota maximální a není možno ji dále zvyšovat, aniž by došlo k poškození led čipů. Dalším problémem, který nastal, bylo chlazení led čipů, což obstarává chladič, který byl navržen pro ztrátový výkon 8 W pro jeden potkávací modul a 9,26 W pro modul dálkový. Tento ztrátový výkon je dosti vysoký, navíc, moduly jsou zavřeny ve světlometu, bez možnosti nasávání studeného vzduchu, obsahuje pouze komory proti zamlžení světlometu. Jako materiál pro chladič byl zvolen hliník, který je jako chladicí prvek osvědčený. Přesto i zde musel být použit jeden ventilátor, který pomáhá ochlazovat plochu chladiče. Je umístěn tak, aby vzduchový rozvaděč rozděloval přiváděný vzduch k ostatním chladičům, čímž bylo dosaženo optimálního chlazení a moduly se tak nepřehřívaly. Reflektor, clona a držák čočky jsou z materiálu PC (plast), tím jsme dosáhli malé váhy samotného modulu. Čočka projektoru je také z plastu, konkrétně z PMMA, který má velmi dobré vlastnosti.

Při celkovém návrhu jednotlivých dílů mě velice překvapilo, že i malé plošky a různé defekty mají obrovský vliv na celkovou fotometrii. Například defekty na čočce v podobě různých propadlin, které jsou vidět až po detailním 3D-skenu, měly za následek to, že celková stopa měla špatnou ostrost a nedalo se ani posunem clony hranici zaostřit.

Pozorováním jednotlivých modulů lze predikovat, že budou do automobilového průmyslu nasazovány čím dál častěji. Ovšem tvrzení, že led diody nezatěžují elektrickou soustavu tak, jako žárovky, není při hlavních funkcích zcela pravdivé. Tento fakt vyplývá z toho, že pokud sečteme příkon tří mini modulů, dostaneme hodnotu kolem 24 W, což je sice téměř poloviční hodnota než u halogenové žárovky, je to však méně o pouhých 10W než v případě výbojky D3S. Jako další bod závěru se jeví potvrzení, že má projektor s LED diodovým zdrojem nejbělejší teplotu barvy, (dle mého názoru je na hranici s namodralou barvou). Myslím si, že barva, kterou nám poskytuje výbojkový zdroj, je příjemnější, než ledově bílá a pro dlouhou jízdu v noci nebude představovat tak velkou zátěž pro oči.

Nesmíme také opomenout halogenový projektor, který jsme v práci porovnávali. U této jednotky dominuje celková cena světlometu a zároveň i jednoduchost tohoto systému. V reálném měřítku bude i

halogenový projektor poskytovat dobré osvětlení vozovky, ale jak již bylo zmíněno, jedná se o levný kompromis, a proto se svými vlastnostmi nedovede vyrovnat konkurentům. Ovšem pokud bychom měli všechny tři projektory srovnat po vzhledové stránce, pak zjistíme, že se na první pohled od sebe tolik neodlišují. Za předpokladu, že by byl navržen stejný design projektorové jednotky i pro led variantu, pak bychom nedokázali laickým okem poznat rozdíl, aniž bychom jednotku rozsvítili.

Závěrem bych chtěl podotknout, že se budou LED diodové aplikace čím dál tím častěji používat, a to na úkor projektorů s xenonovou výbojkou a ať chceme nebo ne, tak paradoxně budou projektory s xenonovou výbojkou postupně vytlačeny a nahrazeny LED technologiemi. Je to dáno především cenou a požadavky zákazníka. Vzhledem k tomu, že jsou halogenové aplikace jednoduché a mají nízkou cenu, je velmi pravděpodobné, že budou na trhu stále zůstat.

Seznam použitých zdrojů

Tuzemské weby:

- 1) *Světlo - časopis pro světlo a osvětlování* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/led-ve-verejnem-osvetleni-skutecnost-versus-myty--15749>
- 2) *ON semiconductor* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/content.do?id=18454>
- 3) *Profielektrika.cz* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/technologie-led-od-l-po-d/view>
- 4) *V-TAC* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://v-tac.cz/content/8-svitivost-svetelny-tok>
- 5) *Aliot* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.aliot.cz/led-technologie.htm>
- 6) *Elkovo čepelik* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.elkovo-cepelik.cz/led-svetelne-diody-light-emitting-diodes>
- 7) *Mediciman* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://medicinman.cz/?p=metody/svetlo>

Zahraniční weby:

- 8) *Digi-Key electronics* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/sep/decoding-led-bin-labels>
- 9) *LUXeXceL* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://blog.luxexcel.com/lighting/led-binning-ansi/>
- 10) *Autolexikon* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/bi-xenonove-svetlomety-vybojky/>

PDF zdroje:

- 11) *Osram* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic1/00165162_0.pdf/OSRAM%20OSTAR%20Headlamp%20and%20Headlamp%20Pro%20%20Details%20on%20Handling%20Mounting%20and%20electrical%20Connection.pdf

12) *Lumileds datasheets: Lumileds Altilon* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z:
<http://www.lumileds.com/uploads/543/DS131-pdf>